

Издается с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 2 (19)
Июнь 2018

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

УЧРЕДИТЕЛЬ – САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ГАГАРИНА Ю.А.

Журнал включён в перечень ведущих рецензируемых научных журналов,
рекомендованных для публикаций Высшей аттестационной комиссией

Главный редактор
Зам. главного редактора
Ответственный секретарь

АРХАНГЕЛЬСКИЙ ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ
БЕКРЕНЕВ НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ
ТРИГОРЛЫЙ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ

Редакционная коллегия

Ю.С. АРХАНГЕЛЬСКИЙ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Н.В. БЕКРЕНЕВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Ю.В. ГУЛЯЕВ	д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, ИРЭ имени В.А. Котельникова РАН, Москва
В.Б. ДЕМИДОВИЧ	д.т.н., профессор, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург
Л.С. ЗИМИН	д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара
С.Г. КАЛГАНОВА	д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.А. КОЛОМЕЙЦЕВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.Н. ЛЯСНИКОВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
А.Н. МАКАРОВ	д.т.н., профессор, ТГТУ, Тверь
Г.А. МОРОЗОВ	д.т.н., профессор, КНИТУ-КАИ, Казань
Ю.П. ПЕРЕЛЫГИН	д.т.н., профессор, ПГУ, Пенза
А.Ф. РЕЗЧИКОВ	д.т.н., профессор, член-корреспондент РАН, ИПТМУ РАН, Саратов
И.В. РОДИОНОВ	д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.П. РУБЦОВ	д.т.н., профессор, НИУ «МЭИ», Москва
Ф.Н. САРАПУЛОВ	д.т.н., профессор, УрФУ, Екатеринбург
Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
С.В. ТРИГОРЛЫЙ	к.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Г.Г. УГАРОВ	д.т.н., профессор, КТИ, Камышин
В.Н. ХМЕЛЕВ	д.т.н., профессор, БТИ, Бийск
В.А. ЦАРЕВ	д.т.н., профессор, СГТУ Гагарина Ю.А., Саратов

Since November 2013
Published Quarterly

№ 2 (19)
June 2018

JOURNAL OF ELECTROTECHNICS

Scientific and Technical Publication

The journal is founded by Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Editor-in-Chief:

ARKHANGELSKY YURIY SERGEEVICH

Assistant to the Editor-in-Chief:

BEKRENEV NIKOLAY VALERYEVICH

Chief Executive Officer

TRIGORLY SERGEI VIKTOROVICH

Editorial Board Members

Yu.S. ARKHANGELSKY

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

N.V. BEKRENEV

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

Yu.V. GULYAEV

Dr.Sc., Professor, Academician of RAS, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Moscow

V.B. DEMIDOVICH

Dr.Sc., Professor, Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI", St.Petersburg

L.S.ZIMIN

Dr.Sc., Professor, Samara State Technical University, Samara

S.G. KALGANOVA

Dr.Sc., Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

V.A. KOLOMEITSEV

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

V.N. LYASNIKOV

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

A.N. MAKAROV

Dr.Sc., Professor, Tver State Technical University, Tver

G.A. MOROZOV

Dr.Sc., Professor, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan

Yu.P. PERELIGIN

Dr.Sc., Professor, Penza State University, Penza

A.F. REZCHIKOV

Dr.Sc., Professor, Corresponding Member of RAS, Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov

I.V. RODIONOV

Dr.Sc., Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

V.P. RUBTSOV

Dr.Sc., Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow

F.N. SARAPULOV

Dr.Sc., Professor, Ural Federal University, Ekaterinburg

Yu.B. TOMASHEVSKY

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

S.V. TRIGORLY

PhD, Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

G.G. UGAROV

Dr.Sc., Professor, Kamishin

V.N. KHMELEV

Dr.Sc., Professor, Biysk Technological Institute, Biysk

V.A. TSAREV

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

Байбурин В.Б., Тертышник В.В., Шуб Г.М., Лунёва И.О., Хороводова Н.Ю. Стерилизация медицинских инструментов на основе СВЧ электро-технологии.....	5
Злобина И.В., Мулдашева Г.К. Повышение эффективности ультразвукового модифицирования поверхности конструкционных металлов и сплавов.....	9
Злобина И.В. Влияние СВЧ электромагнитного поля на прочностные характеристики отвержденного углепластика	14
Мулдашева Г.К., Злобина И.В., Бекренев Н.В. Обоснование одновременной доводки близкорасположенных отверстий малого диаметра с помощью ультразвука	19
Фурсаев М.А. Особенности построения источника СВЧ энергии для силового воздействия на диэлектрические материалы	26
Хмелёв В.Н., Сливин А.Н., Абрамов А.Д. Ультразвуковая консолидация тонколистовых металлов для реализации аддитивных технологий.....	30
Архангельский Ю.С., Юдина В.О. Особенности конструкции и расчета методической СВЧ электротермической установки для нагрева вязкой жидкости в потоке.....	39

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Мошкин В.И., Угаров Г.Г., Шестаков Д.Н. Эффективность преобразования магнитной энергии импульсного линейного электромагнитного двигателя в его энергетических режимах	43
--	----

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Голембиовский Ю.М., Томашевский Ю.Б., Старков А.В. Трёхфазный инвертор с амплитудно-импульсной

модуляцией для систем локального электроснабжения	48
Артюхов И.И., Молот С.В., Тулепова Г.Н. Обеспечение электромагнитной совместимости в гибридной системе электроснабжения на основе источников энергии различной физической природы.....	55

ЭЛЕКТРОНИКА

Яфаров Р.К., Новиков П.Е., Еремин В.П., Кочнев Д.О. Исследование возможности создания автоэмиссионного катода для безнакального магнетрона на основе алмазографитового нанокompозита.....	62
Кошелев П.А., Парамонов С.В. Параметры обмотки электромагнитного изделя.....	72

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Скворцов А.А., Торгашов Е.А. К расчету коэффициентов передачи шлейфовых разветвлений СВЧ устройства на связанных прямоугольном волноводе и П-волноводе с выступами на ребре.....	80
---	----

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Злобина И.В., Бекренев Н.В. Влияние СВЧ электромагнитного поля на микроструктуру отвержденных армированных углеродными волокнами полимерных композиционных материалов	86
--	----

ЛЕТОПИСЬ

Крымский мост. <i>Интервью с Н.Е. Кокодеевой</i>	97
Архангельский Ю.С. Перспективы применения разработок СГТУ имени Гагарина Ю.А. в области СВЧ электро-технологии в г. Саратове.....	99
К сведению авторов	103

CONTENTS

ELECTROTHERMY

- Bayburin V.B., Tertyshnik V.V., Shub G.M., Luneva I.O., Khorovodova N.Yu.** Sterilization of medical instruments based on microwave technologies 5
- Zlobina I.V., Muldasheva G.K.** Increasing efficiency of ultrasonic surface modification for structural metals and alloys 9
- Zlobina I.V.** Impact of the microwave in the electromagnetic field on the strength of the hardened carbon composite 14
- Muldasheva G.K., Zlobina I.V., Bekrenev N.V.** Justification of simultaneous refinement of the closely spaced small diameter openings using the ultrasound 19
- Fursaev M.A.** Design features of a microwave power source for applying force to dielectric materials 26
- Khmelev V.N., Slivin A.N., Abramov A.D.** Ultrasonic consolidation of thin metal foils for additive technologies 30
- Arkhangelsky Y.S., Yudina V.O.** Design features and calculations to continuous microwave electrothermal installations for heating the flow of a viscous liquid 39

ELECTROMECHANICS

- Moshkin M.I., Ugarov G.G., Shestakov D.N.** Efficiency of magnetic energy transformations in the pulse linear electromagnetic motor in its energy modes 43

ELECTRIC POWER SUPPLY

- Golembiovsky Yu.M., Tomashevsky Yu.B., Starkov A.B.** A three-phase voltage inverter with amplitude and pulse-type modulation for the local electricity supply systems 48

- Artyukhov I.I., Molot S.V., Tulepova G.N.** Electromagnetic compatibility in hybrid power supply systems with the energy sources of various physical nature 55

ELECTRONICS

- Yafarov R.K., Novikov P.E., Eremin V.P., Kochnev D.O.** Investigating a possibility for creating an autoemission cathode for a non-spark magnetron based on the diamond-graphite nanocomposite 62
- Koshelev P.A., Paramonov S.V.** Parameters for the windings of electromagnetic items 72

ELECTRODYNAMICS

- Skvortsov A.A., Torgashov E.A.** Calculation of the transfer ratio of the branch-line junctions in microwave devices to the fixed rectangular waveguides and p-waveguides with protrusions on the edges 80

MATERIALS SCIENCE

- Zlobina I.V., Bekrenev N.V.** Impact of the microwave electromagnetic field on the microstructure of hardened polymer composites reinforced by carbon fibers 86

CHRONICLE

- The Crimean bridge.
Interview with N.E. Kokodeeva 97
- Arkhangelsky Y.S.** Prospects for the application of developments of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov in the field of microwave electrotechnology in Saratov 99
- Information for Authors 103

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.37, 621.385.69

СТЕРИЛИЗАЦИЯ МЕДИЦИНСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ НА ОСНОВЕ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

В.Б. Байбурин, В.В. Тертышник, Г.М. Шуб,
И.О. Лунёва, Н.Ю. Хороводова

STERILIZATION OF MEDICAL INSTRUMENTS BASED ON MICROWAVE TECHNOLOGIES

V.B. Bayburin, V.V. Tertyshnik, G.M. Shub,
I.O. Luneva, N.Yu. Khorovodova

Исследованы различные способы воздействия СВЧ излучения на хирургические инструменты с целью их стерилизации. Выбран наилучший способ, обеспечивающий за время 5-7 минут полное подавление всех видов микробных тел, включая спорую флору. Создано компактное устройство для стерилизации.

Ключевые слова: стерилизация медицинских инструментов, СВЧ излучение, бактериологический анализ

Задачи, связанные со стерилизацией различных медицинских материалов, включая, например, медицинские инструменты, актуальны как с точки зрения практического применения, так и для понимания механизма стерилизации.

Наряду с традиционными устройствами и методами физической и химической стерилизации в последние годы вызывают особый интерес способы и устройства, основанные на эффектах воздействия электромагнитных полей на микроорганизмы [1]. Это связано с возможностью создания на их основе компактных, экологических, быстродействующих устройств.

В данной работе приведены экспериментальные результаты, полученные в этом направлении, и характеристики предлагае-

The article deals with various methods of exposure to microwave radiation on surgical instruments for sterilization. The best method is chosen, which provides 100% sterilization of all types of microbial bodies, including spore flora, within 5-7 minutes. On the basis of researches 2 patents are received and the compact device of sterilization is created.

Keywords: sterilization processing of medical instruments, microwave radiation, bacteriological analysis

мого стерилизатора в СВЧ диапазоне. Работа проводилась совместно с сотрудниками кафедры микробиологии СГМУ. Бактериологический анализ проводился до и после стерилизационной обработки выбранного по рекомендации медицинских работников типового набора хирургических инструментов. При этом в эксперимент брались инструменты с «бытовым» инфицированием и заражением эталонными музейными штаммами условно-патогенных спорообразующих бактерий, часто контаминирующих объекты госпитальной среды.

Исследованные способы стерилизационной обработки. Возможны различные подходы к стерилизационной обработке материалов и инструментов с использованием электромагнитных полей СВЧ диапа-

зона, как путем прямого воздействия, так и с привлечением дополнительных факторов и рабочих сред.

Было проведено сравнительное исследование следующих основных способов воздействия СВЧ излучения на обрабатываемые медицинские инструменты.

А. Непосредственное воздействие СВЧ электромагнитных волн на инструменты в рабочей СВЧ камере при обычных комнатных температурах и атмосферных условиях.

Б. Воздействие СВЧ излучения в условиях иницируемого им плазменного разряда при давлении 10-30 мм рт. ст. на инструменты, помещенные внутрь кварцевой колбы, которая, в свою очередь, помещается в волноводную СВЧ камеру.

В. Воздействие СВЧ излучения на инструменты, помещенные в водную среду с добавками, в прозрачном для СВЧ электромагнитной волны контейнере, находящимся в рабочей камере (резонаторе).

Основные результаты экспериментов. В экспериментах по способу А рассматривалось непрерывное облучение (мощностью до 4 кВт) и импульсное (10-20 кВт, длительность импульса до 2 мс). Расположение инструмента – прозрачная для СВЧ электромагнитной волны колба, помещенная в прямоугольный волновод перпендикулярно его широкой стенке.

Эксперименты показали, что в рассмотренных режимах удается за 10 минут стерилизовать медицинские инструменты, инфицированные естественным путем. Однако спорообразующие бактерии (например, *B. subtilis*) уничтожить не удастся, хотя уровень обсемененности существенно уменьшается (в 1000 раз).

Кроме того, недостатком метода является необходимость использования высокого уровня СВЧ мощности и дополнительного оборудования (модулятора для обеспечения импульсного режима).

В экспериментах по способу Б реализовывалось воздействие на инструменты (скальпель, инъекционная игла, ложка Фолекмана) плазмы, возбуждаемой СВЧ элек-

тромагнитным полем. При этом в режиме непрерывного воздействия мощность облучения доходила до 2 кВт, а время обработки до 10 с.

В режиме импульсного облучения мощность составляла от 2 до 22 кВт, время обработки ~2,5 мин, длительность импульса 250 мс – 2 нс, скважность 25-45.

Эксперименты показали, что при импульсной мощности 22 кВт, длительности импульса 2 мс, времени обработки 150 с, 2,5 мин имеет место полная стерилизация, в том числе, с уничтожением спорных бактерий.

Вместе с тем имеются существенные недостатки:

- наличие повреждений инструментов;
- необходимость индивидуальной обработки каждого инструмента;
- усложнение аппаратуры за счет применения вакуумного насоса.

Наибольшую эффективность стерилизационной обработки обеспечивает способ В. Мощность облучения – не менее 600 Вт в непрерывном режиме. Обрабатывались в наборе широко используемые в медицинской практике различные типы хирургических инструментов: выкусыватель угловой, крючок для ран, пепан толстый и тонкий, зажим Кохера, кусачки, скальпель, пинцет, боты, диск алмазный и др.

Исследование возможностей и эффективности стерилизации проводилось следующим образом. Хирургические металлические инструменты инфицировали 48-72 часовой культурой спороносных бактерий *B. subtilis*.

Культуру спороносных бактерий *B. subtilis* 468 засеивали в 100-150 мл мясopептoнoгo бульoнa и культивировали при температуре 37°C 48-72 часа, после чего взвесь бактерий выдерживали при температуре – 5°C и готовили мазки, используя окpаску по методу Клейна для определения наличия спор. Спорообразование было достаточно выражено (несколько десятков в поле зрения). Взвесью ($5 \cdot 10^8$ м.т./мл) этой культуры обрабатывали инструменты влажным тампоном, обильно смоченным в указанной взвеси бактерий. Инфицированные инстру-

менты подсушивали в термостате в течение 30-45 минут на листах стерильной бумаги, заворачивали в нее и отправляли для СВЧ стерилизации.

Исследование возможности и качества стерилизации проводилось в различных режимах, в частности:

- при различной длительности СВЧ обработки;
- с использованием различных растворов;
- при различных объемах растворов;
- с различным количеством хирургических инструментов;
- при различной начальной температуре раствора и помещенных в него инструментов;
- при различной продолжительности кипения раствора;
- при различной комбинации инструментов;
- при различных режимах нагрева (размещения сосуда).

Стерилизованные инструменты упаковывались в стерильные салфетки, стерильную бумагу и подвергались бактериологическому исследованию.

При проведении бактериологического контроля производился тщательный смыв инструментов влажным тампоном, смоченным физиологическим раствором. Обработывалась вся поверхность инструмента. Смывы помещались в 10 мл мясопептонного бульона и культивировались при температуре 37°C 24 часа. Из этих посевов производился высев на чашки Петри с мясопептонным агаром. Посевы выдерживались 24 часа при температуре 37°C и оценивали результат – наличие или отсутствие роста колоний *B. Subtilis*.

С целью минимизации времени обработки была разработана специальная до-

бавка (ингредиент) к раствору, помещаемому в стерилизационный контейнер.

Проведенный цикл экспериментов по методу В, подтвержденный результатами бактериологического анализа, показал, что для любого набора хирургических инструментов и любого уровня инфицирования в течение 5-7 мин обеспечивается полная стерилизация, то есть полное уничтожение всех видов микробных тел споровой флоры.

Касаясь механизма процесса стерилизации в СВЧ электромагнитном поле, можно указать на следующие неравноценные по силе влияния факторы.

Разрыв структуры мембраны бактериальных клеток под действием переменного электрического поля [2], кавитационный эффект (пузырьковый), термический эффект за счёт кипения жидкости. При этом предпочтение, по-видимому, следует отдать первому фактору, поскольку остальные два в том или ином виде присутствуют в известных стерилизационных установках и требуют значительного времени обработки (десятки минут и часы). На основе проведенных в различные годы экспериментов получены два патента [3, 4] на способ стерилизации и устройство для стерилизации.

Патенты реализованы в разработанном в СГТУ имени Гагарина Ю.А. сверхбыстродействующем компактном стерилизаторе переносного типа, ориентированном на широкое применение в различных медицинских учреждениях, клиниках, амбулаторных пунктах, полевых госпиталях, стоматологических кабинетах, медицинских образовательных учреждениях. По своим основным характеристикам, времени стерилизации, габаритам, весу, простоте технологии отмеченный стерилизатор существенно превосходит возможности устройств, предложенных в патентах [5, 6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Семенов А.С. СВЧ энергия и ее применение: особенности, оборудование, технологические процессы / А.С. Семенов, В.Б. Байбурин. Саратов: Изд-во Саратов. унта, 1999. 114 с.

2. Исмаилов Э.Ш. Биофизическое действие СВЧ излучений / Э.Ш. Исмаилов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 144 с.

3. Патент РФ № 2130319, МПК А61L 2/12 (1995.01) Способ быстрой стерилиза-

ции медицинских инструментов / В.Б. Байбурин, Б.Н. Максименко, А.А. Терентьев, А.Ю. Михайлин, И.О. Лунева, Г.М. Шуб; заявитель и патентообладатель Саратов. гос. техн. ун-т, № 96112325/14; заявл. 18.06.1996; опубл. 20.05.1999.

4. Патент РФ № 45271, МПК А61L 2/12 (2000.01) Устройство сверхбыстрой стерилизации медицинских инструментов / В.Б. Байбурин, В.В. Тertyshnik, Г.М. Шуб, Ю.П. Волков, Р.И. Капрелов; патентообладатель Байбурин В.Б.,

№ 2004136734/22; заявл. 14.12.2004; 10.05.2005 Бюл. № 13.

5. Патент США № 5019344, Method for sterilizing articles such as dental handpieces / Barry S. Kutner, Wilton; Daniel A. Latowicki, Newtown, both of Conn; filed 21.04.1988; 28.05.1991.

6. Патент США № 5019359, Method and apparatus for rapid sterilization of material / Barry S. Kutner, Wilton; Daniel A. Latowicki, Newtown, both of Conn; filed 22.11.1989; 28.05.1991.

Байбурин Вил Бариевич – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой «Информационная безопасность автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Тertyshnik Валерий Васильевич – кандидат технических наук, доцент

Шуб Геннадий Маркович – доктор медицинских наук, профессор

Лунёва Ирина Олеговна – кандидат медицинских наук, доцент кафедры микробиологии, вирусологии и иммунологии Саратовского государственного медицинского университета имени В.И. Разумовского

Хороводова Наталия Юрьевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vil B. Bayburin – Dr.Sc., Professor Head: Department of Information Security of Automated Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Valery V. Tertyshnik – PhD, Associate professor

Gennady M. Shub – Dr.Sc., Professor

Irina O. Luneva – PhD, Associate Professor, Department of Microbiology, Virology and Immunology, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky

Natalia Yu. Khorovodova – PhD, Associate Professor, Department of Information Security of Automated Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.05.18, принята к опубликованию 20.06.18

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

И.В. Злобина, Г.К. Мулдашева

INCREASING EFFICIENCY OF ULTRASONIC SURFACE MODIFICATION FOR STRUCTURAL METALS AND ALLOYS

I.V. Zlobina, G.K. Muldasheva

Выполнены исследования влияния силового воздействия колеблющегося с ультразвуковой частотой индентора на структуру и физико-механические свойства поверхностного слоя конструкционных металлов и сплавов. Установлен факт зависимости изменений в структуре поверхностного слоя и его микротвердости от частоты подаваемого на ультразвуковой электромеханический преобразователь напряжения и колебаний индентора. Показана корреляция влияния частоты ультразвукового воздействия с размерами фрагментов структуры. Предложен механизм местного повышения микротвердости поверхности под торцом индентора.

Ключевые слова: ультразвуковые колебания, электромеханический преобразователь, индентор, микроструктура, внутренний резонанс, микротвердость

В настоящее время одним из основных показателей конкурентоспособности перспективных изделий различного назначения является надежность их функционирования в течение заданного срока эксплуатации. Применительно к машино- и приборостроению это означает сохранение точности сопряжений двигающихся звеньев и их целостности при воздействии внешних нагрузок. Одним из эффективных процессов формирования требуемых прочностных характеристик поверхности конструкционных материалов в настоящее время может считаться ультразвуковое пластическое деформирование специальным индентором,

The research considers the power impact fluctuating at ultrasonic frequency of an indenter on the structure and physical and mechanical properties of the surface layer of structural metals and alloys. The dependence of changes in the structure of the surface layer and its microhardness on the frequency of tension provided for the ultrasonic electromechanical converter and indenter fluctuations have been established. Correlation between the influence of the ultrasonic impact frequency and size of the fragment structure is shown. A mechanism for the local increase in microhardness of the surface under the end face of the indenter is proposed

Keywords: ultrasonic fluctuations, electromechanical converter, indenter, microstructure, internal resonance, microhardness

формирующее практически любой требуемый микрорельеф с одновременным упрочнением поверхности [1, 2]. Однако для повышения эффективности практического применения данного процесса в производстве имеются резервы, связанные с определением оптимальных для конкретного материала и его первоначального состояния амплитудно-частотных параметров ультразвукового воздействия.

Нами исследовано изменение структуры и микротвердости поверхности конструкционных материалов после ультразвукового воздействия торцом стержневого индентора.

На образцы воздействовали инструментом, представлявшим собой цилиндрический индентор диаметром 8 мм из стали ШХ-15, закаленной до твердости 50-55 HRC. Торец инструмента был выполнен плоским с шероховатостью $Ra = 0,63$ мкм. Неперпендикулярность торца относительно оси не более 5 мкм. Статическое усилие прижатия инструмента к поверхности образцов составляло 5 Н. Амплитуду колебаний инструмента регулировали в диапазоне 5-12 мкм изменением выходной мощности ультразвукового генератора УГТ-901. Образцы представляли собой цилиндры диаметром 10 мм и высотой 5 мм. Исследовали следующие материалы: медь М1 ГОСТ 859-2001, сплав на основе цинка ЦА4М1 ГОСТ 25140-93, сталь 9ХС ГОСТ 1050-88 и сталь 45 1050-88 в состоянии поставки, сталь 45,

термообработанную до твердости поверхности HRC 32...35. Поверхность образцов шлифовали до шероховатости $Ra = 1,25$ мкм, а затем приготавливали микрошлифы по обычной методике. До и после ультразвуковой обработки изучали структуру поверхности на компьютерном анализаторе изображений микроструктур АГПМ-6М с использованием разделов программы Metallograph «Структура» и «Гранулометрический анализ» для получения банка данных по форме и размерам элементов структуры и определяли микротвердость на цифровом микротвердомере HVS-1000. Измерения повторяли не менее 5 раз.

Некоторые типичные результаты изменения структуры исследованных материалов под действием ультразвука представлены на рис. 1 и 2.

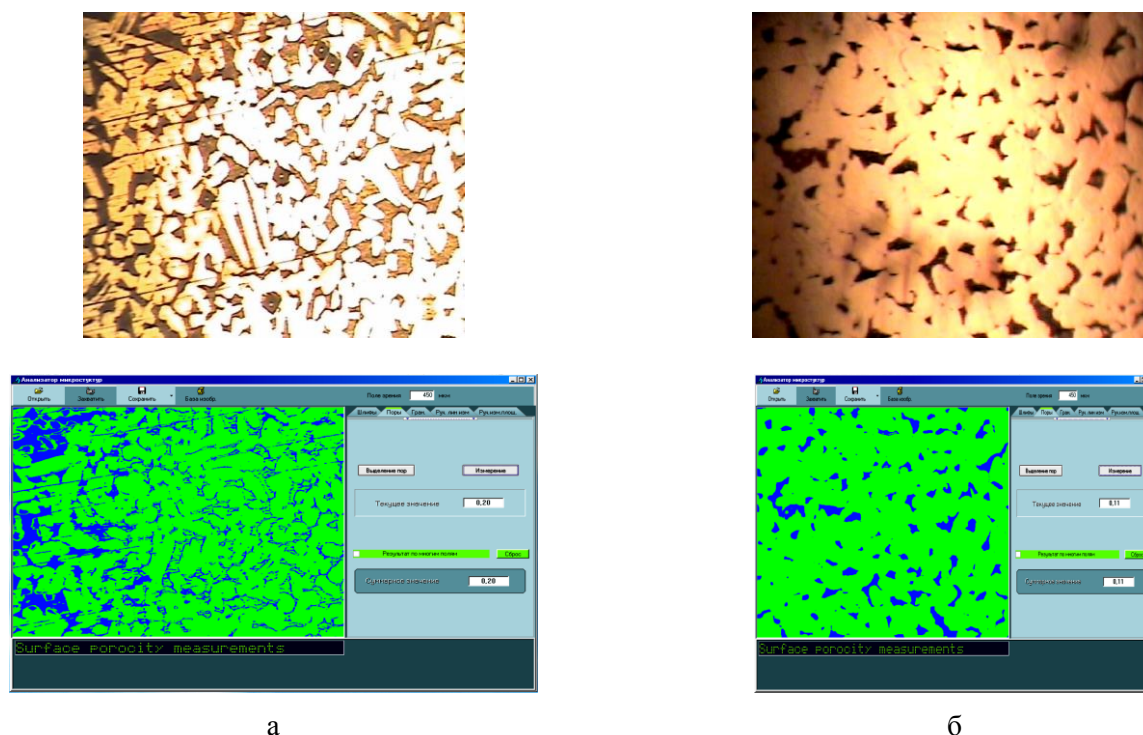


Рис. 1. Структура поверхности и результат ее компьютерной обработки образцов из сплава ЦА4М1 в исходном состоянии (а) и после ультразвукового воздействия (б) с нагружением 0,5 Н (размеры изображений соответствуют 450×450 мкм)

На микрофотографиях отчетливо заметны светлые и темные поля, форма и размеры которых отличаются для разных материалов. На основе анализа микрофотографий установлено, что воздействие ультразвука на индентор приводит к измельчению структуры меди и цинка в 2,5-

3,5 раза при сокращении доли темных полей примерно в 2 раза для цинка и на 11% для меди. Измельченные фрагменты структуры имеют более правильную форму, чем исходные.

Данные по определению микротвердости образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Изменение микротвердости материалов под воздействием ультразвука

Состояние материала	Цинк ЦА4М1	Медь М1	Сталь 20	Сталь 45	Сталь 45 после ТО
$H_{\mu}, H/mm^2$					
Исходный	214,6	284	446,5	374,8	1028
После воздействия ультразвука	169	279	565	472,2	1162

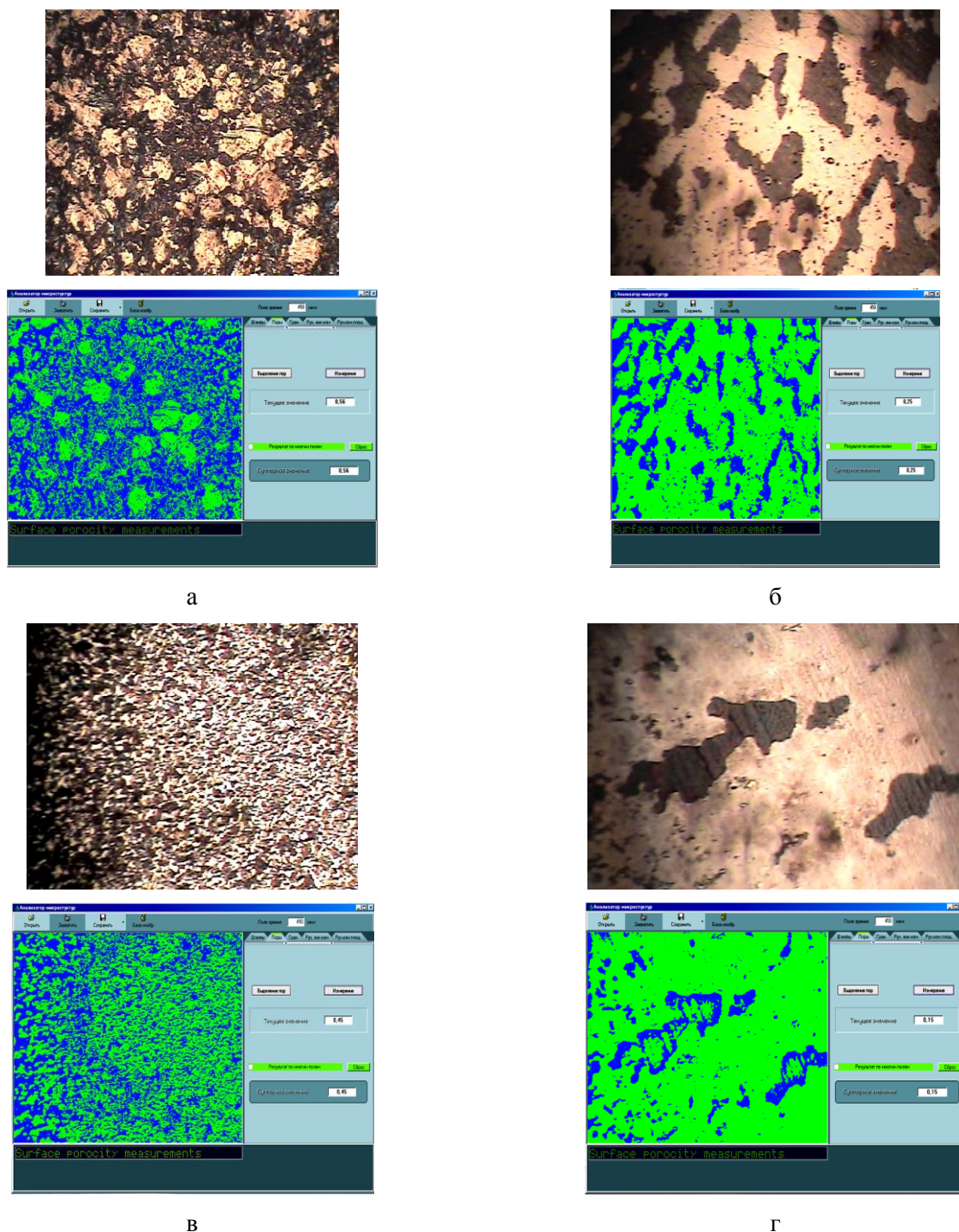


Рис. 2. Структура поверхности и результат ее компьютерной обработки образцов из стали 45 в состоянии поставки (а, б) и после термической обработки (в, г) в исходном состоянии (а, в) и после ультразвукового воздействия (б, г) с нагружением 0,5 Н (размеры изображений соответствуют 450×450 мкм)

Микротвердость светлых полей цветных сплавов меньше на 25-35%, чем темных. Микротвердость меди снижается незначительно, а цинка – на 22%. У стальных образцов независимо от марки стали и ее состояния (сырая или закаленная) наблюдается изменение формы зерен (они становятся вытянутыми) практически без изменения размера и повышение плотности их упаковки. Об этом свидетельствует снижение доли темных полей у не термообработанных сталей 9ХС и 45, соответственно, с

47 до 15% и с 27 до 15% и с 9 до 6% для закаленной стали 45. Наряду с этим установлено увеличение микротвердости на 26,5% в образцах из стали 9ХС, на 24,3% – стали 45 и на 13% – термообработанной стали 45.

Объяснить полученные данные можно на основе гипотезы, вытекающей из сопоставления акустических свойств исследуемых материалов, средних размеров элементов их кристаллической структуры и параметров воздействия ультразвука (табл. 2).

Таблица 2

Размеры зерен структуры и акустические свойства материалов

Материал	Скорость звука C_{36} , м/с [1]	Длина волны, м при $f = 22$ кГц $\lambda = C_{36}/f$	Средний размер, м элементов структуры Δ	Собственная частота, кГц $f_c = C_{36}/\Delta$	$k_\lambda = \lambda/\Delta$	$k_f = f_c/f$
1	2	3	4	5	6	7
Цинк ЦА4М1	3725	0,169	223×10^{-6}	16700	758	759
Медь М1	3842	0,175	110×10^{-6}	35000	1591	1591
Сталь 20, сталь 45	5100	0,232	22×10^{-6}	231800	10545,45	10536,36
Сталь 45 (закалка)	5177	0,235	$5,5 \times 10^{-6}$	941000	42727,27	42772,7

Для дальнейших рассуждений примем, что средний размер элементов структуры равен длине волны ее собственных колебаний. Если теперь взять отношение (графа 7) собственной частоты колебаний структуры (графа 5) и частоты воздействия индентора, видно, что для цинка и меди оно представляет собой целое число, то есть одна из гармоник колебаний индентора может стать причиной внутреннего резонанса, приводящего к разрушению зерен и их дроблению на фрагменты.

Этим можно объяснить меньшую микротвердость поверхности меди и цинка, так как формируется больше границ раздела и микротрещин. Также о возможности внутреннего резонанса может свидетельствовать выраженное целым числом отношение длины волны ультразвуковых колебаний частотой 22 кГц для меди и цинка и разме-

ра зерен структуры. Соответственно у сталей не наблюдается целочисленных соотношений размерных и акустических параметров структуры с параметрами ультразвукового воздействия. Поэтому наблюдается механическая вибрационная деформация зерен, уплотнение структуры и, как следствие, – повышение микротвердости. Использование частоты колебаний индентора 44 кГц (в 2 раза больше) дало аналогичные результаты.

Для объяснения факта изменения микротвердости в светлых и темных полях поверхности исследованных материалов можно предложить следующий механизм упрочнения. Светлые поля на микрофотографии представляют собой выступы микропрофиля, а темные поля – впадины. Обрабатываемая поверхность образцов после прохождения инструмента приоб-

рела определенный микрорельеф, характеризующийся совокупностью выступов и впадин. Очевидно, что индентор касается своим плоским торцом сначала наиболее высоких, а по мере их деформации – низких выступов. Под действием ультразвука интенсифицируется сбег дислокаций с вершин выступов во впадины и их накопление. Вследствие увеличения количества дислокаций во впадинах можно ожидать более значительного увеличения микротвердости материала после обработки во впадинах микрорельефа.

Таким образом, из результатов наших исследований следует, что для интенсификации ультразвуковой обработки резанием необходимо применять частоты колебаний инструмента, обеспечивающие стабильные высшие гармоники, соответствующие собственным частотам колебаний элементов кристаллической структуры. В рассматриваемом случае для размерной обработки могут применяться

следующие частоты: при обработке цинка 16,7 кГц; при обработке меди – 35 кГц; незакаленные углеродистые стали возможно обрабатывать при частотах 23,2 или 231,8 кГц; при обработке закаленных углеродистых сталей целесообразны частоты 94,1 или 941 кГц.

В процессах ультразвуковой поверхностно-упрочняющей обработки (например – выглаживания) целесообразно, напротив, исключить вероятность появления указанных гармоник.

Для практического внедрения результатов в промышленности необходимо создание ультразвуковых генераторов технологического назначения, обеспечивающих формирование выходного сигнала с плавной регулировкой частоты в диапазоне 18-100 кГц, достаточной для задач силовой обработки мощности (100-500 Вт), а также ультразвуковых электромеханических преобразователей, имеющих, как минимум, 2 резонансные частоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Материаловедение и технология металлов / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин и др. М.: Высшая школа, 2008. 877 с.

2. Бржозовский Б.М. Ультразвуковые технологические процессы и оборудование в машино- и приборостроении / Б.М. Бржозовский, Н.В. Бекренев. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2009. 348 с.

Злобина Ирина Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Мулдашева Гузель Канаткалиевна – аспирант кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Irina V. Zlobina – PhD, Associate Professor, Department of Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Guzel K. Muldasheva – Postgraduate, Department of Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 01.06.18, принята к опубликованию 20.06.18

ВЛИЯНИЕ СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТВЕРЖДЕННОГО УГЛЕПЛАСТИКА

И.В. Злобина

IMPACT OF THE MICROWAVE IN THE ELECTROMAGNETIC FIELD ON THE STRENGTH OF THE HARDENED CARBON COMPOSITE

I.V. Zlobina

Выполнены экспериментальные исследования изменения прочностных характеристик образцов из отвержденного полимерного композиционного материала, армированного углеродными волокнами, после кратковременного воздействия СВЧ электромагнитного поля частотой 2450 МГц. Установлено, что при времени воздействия 1 минута обеспечивается увеличение предельных напряжений межслоевого сдвига на 70-80%, модуль упругости возрастает на 14-20%. Наибольший эффект достигается на меньших дистанциях и при меньшем времени. Отмечено значительное (на один-два порядка) снижение дисперсии исследуемых параметров, что позволяет сделать вывод о повышении равномерности прочностных характеристик в партии образцов после СВЧ воздействия.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, отверждение, СВЧ электромагнитное поле, межслоевой сдвиг, напряжения, модуль упругости, прочность

Воздушно-космические силы являются в настоящее время одним из наиболее эффективных и быстро развивающихся средств сдерживания потенциального противника и противодействия различным внешним угрозам России. Также развитие воздушных средств транспорта имеет важное значение для освоения экономических районов Сибири и Крайнего Севера, их производство является стимулом для внедрения инноваций в другие технологические сферы.

В настоящее время в конструкционных элементах беспилотных летательных ап-

The article presents the pilot studies dealing with the changes in strength characteristics of the samples from hardened polymer composite materials reinforced by carbon fibers after a short-term exposure to the microwave of the electromagnetic field at the 2450 MHz frequency. It is established that after a minute exposure, the extreme tension in the interlayer shift increases by 70-80%, and the elasticity module increases by 14-20%. The maximum effect is reached at the minimum distances and minimum time span. A decrease in dispersion of the studied parameters is significant (by one or two orders) which allows to conclude about an increase in uniformity of strength characteristics in the sample party found as a result of the microwave effect.

Keywords: polymer composite materials, hardening, microwave electromagnetic field, interlayer shift, tension, elasticity module, durability

паратов, в производстве самолетов, а также космических аппаратов и автомобильного транспорта расширяется применение неметаллических полимерных композиционных материалов (ПКМ), в частности, армированных углеродными волокнами. Эта тенденция будет усиливаться в ближайшей и отдаленной перспективе [1, 2]. Однако эти материалы отличаются высокой анизотропией свойств. Особенно это характерно для прочности ПКМ по напряжениям межслоевого сдвига, которые могут быть в два и более раз меньше,

чем при растяжении-сжатии. Поэтому при проектировании изделий из ПКМ и разработке их технологий наибольшее внимание уделяется увеличению прочности именно по данному параметру. Технологии синтеза новых компонентов ПКМ и их формирования достаточно сложны и требуют длительных сроков для совершенствования, а также создания нового сложного оборудования [3].

Применение электромагнитных полей, в частности СВЧ диапазона, для тепловой и нетепловой обработки диэлектрических материалов позволяет интенсифицировать процесс и повысить степень равномерности обработки вследствие объемного характера воздействия. Доказано, что, варьируя геометрию и напряженность электрического поля, можно значительно интенсифицировать процесс термообработки, повысить качество изделий, разработать новые виды термических процессов, невозможные для реализации при использовании традиционных методов нагрева.

В настоящее время благодаря работам отечественных и зарубежных ученых в основном создана теория СВЧ нагрева диэлектрических материалов и разработаны научные основы расчета СВЧ камер различного типа и технологических магнетронов. Получены результаты, свидетельствующие о положительном влиянии на прочность и другие свойства стекловолоконных и других полимерных материалов нетеплового СВЧ воздействия [4-6].

В то же время в области направленного СВЧ модифицирования отвержденных неметаллических материалов с уже сформированной структурой работ относительно немного, и они посвящены главным образом относительно однородным по диэлектрическим свойствам композициям: композитам, синтетическим волокнам и стеклотканым материалам.

Целью исследований является изучение влияния СВЧ электромагнитного поля на предельные напряжения межслоевого сдвига и модуль упругости ПКМ с квазиизотропной структурой, армированных углеродными волокнами.

Исследовали образцы в виде балок сечением 10×5 мм и длиной 70 мм из отвержденного композита КМКУ-1.80.Э0,1, состоящего из матрицы на основе клеевого связующего ВК-51 и наполнителя – углеродной ленты ЭЛУР-П-А с объемной долей наполнителя 70-75%. В экспериментах использовали микроволновую установку «Жук-2-02» производства ООО «АгроЭкоТех», г. Обнинск Калужской обл., с излучающей антенной рупорного типа (рис. 1). Установка генерирует электромагнитное поле частотой 2450 МГц при выходной мощности 1200 Вт. Данная схема принята в связи с практической потребностью обработки изделий сложной геометрической формы размерами до 3000×5000 мм, что затрудняет равномерную обработку в СВЧ камере. Для воздействия использовали дистанции от плоскости антенны до поверхности образца 100 и 200 мм. Время обработки по результатам ранее проведенных нами исследований [7-9] принимали равным 1 и 2 минуты. Испытания образцов до и после обработки проводили на компьютерной установке, оснащенной тензометрическими датчиками усилий и червячным механизмом нагружения. Обработка результатов измерения нарастания приложенной к образцу нагрузки производилась по специальной заложенной в установку программе (LabVIEW, г. Орел) и позволила получить графики нагрузки (момента на приводе) в динамике от момента приложения до разрушения. По известным зависимостям механики материалов вычисляли напряжения межслоевого сдвига и модуль упругости.

Результаты экспериментов представлены на рис. 3 и в таблице.

Установлено, что после воздействия СВЧ электромагнитного поля предельные напряжения межслоевого сдвига возрастают с 94-95 МПа у контрольных образцов до 170-175 МПа при дистанции 100 мм и времени 1 минута и 160-162 МПа при дистанции 200 мм и том же времени воздействия. При этом время обработки влияет на изменение напряжений следующим образом. Увеличение времени с 1 до 2 минут приво-

дит к снижению предельных напряжений в образцах, обработанных на дистанции 100 мм, до 165-167 МПа. У образцов, обработанных при дистанции 200 мм, напротив,

наблюдается увеличение напряжений до 168 МПа. Таким образом, увеличение предельных напряжений межслоевого сдвига составляет от 70% до 80%.



а



б

Рис. 1. Микроволновая установка «Жук-2-02». Общий вид (а). Образцы на рабочем столе (б)



а



б

Рис. 2. Экспериментальная установка для проведения испытаний. Общий вид (а). Образец в процессе деформации (б)

Дисперсия значений напряжений межслоевого сдвига и модуля упругости
обработанных образцов в сравнении с контрольными

Образец	Контрольный	Обработка $L = 100 \text{ мм}, t = 1 \text{ мин}$	Обработка $L = 200 \text{ мм}, t = 1 \text{ мин}$	Обработка $L = 200 \text{ мм}, t = 2 \text{ мин}$
$\Delta\sigma_F$	0,04	0,0035	0,0023	0,005
ΔE	0,054	0,0003	0,007	0,003

Влияние СВЧ электромагнитного поля на модуль упругости проявляется аналогичным образом. При обработке на дистанции 100 мм в течение 1 минуты значение данного параметра возрастает с 2,8 ГПа у контрольных образцов до 3,4 ГПа. При обработке на дистанции 200 мм модуль упру-

гости увеличивается до 3,2 ГПа. При увеличении времени обработки до 2 минут значение модуля упругости снижается до 3,3 ГПа на дистанции 100 мм и возрастает до 3,3-3,35 ГПа на дистанции 200 мм. В среднем получено увеличение модуля упругости на 14-20%.

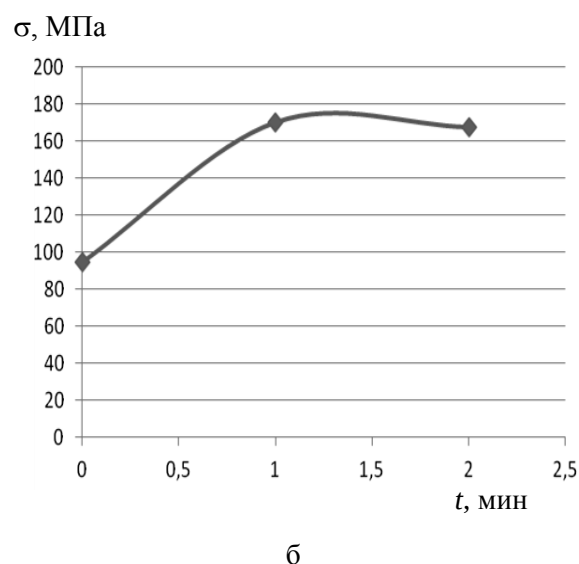
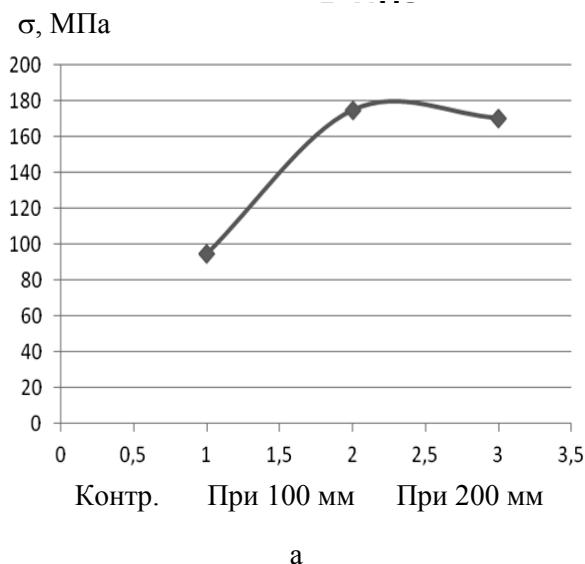


Рис. 3. Влияние обработки в СВЧ электромагнитном поле на напряжения межслоевого сдвига в зависимости от дистанции до плоскости излучающей антенны при времени обработки 1 мин (а) и в зависимости от времени обработки на дистанции 100 мм (б)

Следует отметить резкое повышение равномерности прочностных характеристик в партии исследованных образцов (проводилось по 5 повторных опытов). Разброс значений напряжений межслоевого сдвига, выраженный в их дисперсии, снижается более, чем на порядок. Дисперсия модуля упругости снижается в еще большей степени. При времени обработки 1 минута снижение достигает двух порядков. Данный результат является свидетельством возможности увеличения стабильности эксплуатационных характеристик в партии деталей и повышении выхода годных изделий за счет их финишной СВЧ обработки.

Данный результат может быть связан с большим выделением теплоты при обработке с большей напряженностью СВЧ электромагнитного поля на дистанции 100 мм, которое с увеличением времени воздействия приводит к деструктивным изменениям в матрице и снижению адгезионных

связей между ее агломератами и волокнами наполнителя. При обработке с меньшей напряженностью (дистанция 200 мм) при времени 2 минуты еще не достигается критическая температура нагрева и деструктивных изменений не происходит. В данном случае при кратковременной обработке на меньших дистанциях может иметь место некоторая оптимальная температура нагрева, приводящая к активации дипольной структуры матрицы и увеличению адгезионных связей, особенно в межфазной зоне «матрица-волокно», что является причиной увеличения прочности по межслоевому сдвигу при обработке на дистанции 100 мм в течение 1 минуты. В данном направлении необходимо продолжение исследований в расширенном диапазоне напряженности СВЧ электромагнитного поля и времени обработки с мониторингом температуры образцов.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-03-00720

«Методология оптимизационного микроконструирования композиционных материалов для объектов сложной формы по-

вышенной динамической прочности, послойно формируемых электротехнологическими методами».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кошкин Р.П.** Основные направления развития и совершенствования беспилотных авиационных систем. <http://spmagazine.ru/420>, дата последнего обращения 28.01.2017 г.

2. **Мирный М.** Мировой рынок углепластиков достигнет отметки в \$23 млрд к 2022 году. URL: <https://gomel-sat.bz/topic/31779-mirovoy-rynok-3d-pechati-dostignet-obyoma-v-23-mlrd-v-2022-godu/> (дата последнего обращения 20.09.2016 г.).

3. **Каблов Е.Н.** Материалы и химические технологии для авиационной техники / **Е.Н. Каблов** // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520-530.

4. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии / Ю.С. Архангельский. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.

5. Экспериментальные исследования уровня неравномерности нагрева диэлектрических материалов и поглощенной мощности в СВЧ устройствах резонаторного типа / В.А. Коломейцев, Ю.А. Кузьмин, Д.Н. Никуйко, А.Э. Семенов // Элек-

тромагнитные волны и электронные системы. 2013. Т. 18. № 12. С. 25-31.

6. Microwave assisted blow molding of polyethylene-terephthalate (PET) bottles / L. Estel, Ph. Lebaudy, A. Ledoux, C. Bonnet, M. Delmotte // Proceedings of the Fourth World Congress on Microwave and Radio Frequency Applications. 2004. № 11. P. 33.

7. **Zlobina I.V.** The Influence of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev // Наукоемкие технологии. 2016. Т. 17. № 2. С. 25-30.

8. **Zlobina I.V.** The influence of electromagnetic field microwave on physical and mechanical characteristics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structural / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev // Solid State Phenomena. 2016. Vol. 870. P. 101-106.

9. **Zlobina I.V.** Increasing of the endurance of polymeric construction materials with the multilevel hierarchical structure in the microwave electromagnetic field / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev, G.K. Muldasheva // AIP Publishing. 10 November 2016. Vol. 1783. 020236-1 – 020236-4.

Злобина Ирина Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Irina V. Zlobina – PhD, Associate Professor, Department of Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 01.06.18, принята к опубликованию 20.06.18

ОБОСНОВАНИЕ ОДНОВРЕМЕННОЙ ДОВОДКИ БЛИЗКОРАСПОЛОЖЕННЫХ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКА

Г.К. Мулдашева, И.В. Злобина, Н.В. Бекренев

JUSTIFICATION OF SIMULTANEOUS REFINEMENT OF THE CLOSELY SPACED SMALL DIAMETER OPENINGS USING THE ULTRASOUND

G.K. Muldasheva, I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev

Разработано и исследовано устройство для сообщения вращения и ультразвуковых колебаний цилиндрическим инструментам с промежутком между их образующими поверхностями не более 0,02-0,05 мм за счет ультразвуковых колебаний общего волновода. Определена возможность получения на инструментах вращающего момента и скорости резания, достаточных для осуществления процесса абразивной доводки легированных закаленных сталей. Исследован процесс доводки близкорасположенных отверстий в упругих подвесах и определены рациональные параметры устройства и технологические режимы, обеспечивающие равномерный съем и точность размера до 0,005 мм.

Ключевые слова: упругие подвесы, близкорасположенные отверстия, перемычка, доводка, жесткость, ультразвуковые колебания, частота, амплитуда, напряжение

В изделиях точной механики применяются гиросtabilизированные платформы, установленные на упругих подвесах (торсионах), жесткость которых обеспечивает стабильность ориентации платформы в пространстве. Несмотря на широкое внедрение в последнее время систем определения и стабилизации положения движущегося объекта, основанных на новых физических принципах (лазерные, волоконно-оптические, твердотельные вибрационные и др.), механические системы еще достаточно долгое время могут применяться в

A device applied for rotation and ultrasonic fluctuations of cylindrical tools having an interval between their surfaces no more than 0,02-0,05 mm due to ultrasonic fluctuations of the general wave guide has been developed and investigated. A possibility to attain the rotation moment and cutting velocity sufficient for abrasive refinement of the alloy-treated hard steel is defined. Refinement of the closely spaced openings in elastic suspensions has been investigated, and the rational parameters of the device, as well as technological modes providing an even removal and size accuracy at 0,005 mm have been determined.

Keywords: elastic suspensions, closely spaced openings, a crossing point, refinement, rigidity, ultrasonic fluctuations, frequency, amplitude, tension

различных областях техники. Поэтому задача разработки высокоэффективных автоматизированных технологий изготовления их элементов остается актуальной.

Упругие подвесы (рис. 1) представляют собой малогабаритные тела вращения с системой вырезов и отверстий, расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях перемычек толщиной 0,02-0,05 мм. Равномерность жесткости перемычек во всех подвесах платформы определяет стабильность ее заданного положения. Параметры жесткости задаются точностью выполнения толщины

перемычки и стабильностью физико-механических свойств материала после термической обработки. Обычно используются сплавы типа 36НХТЮ и легированные стали с твердостью до HRC 45...50. Толщина перемычки обеспечивается размерной обработкой образующих ее отверстий, включающей сверление, тонкое растачивание и доводку. Выполнение этих операций представляет собой достаточно сложную задачу вследствие их малого диаметра (2,0-2,5 мм) и малой толщины перемычки особенно на операциях доводки, характеризующихся значительными радиальными давлениями на стенки отверстия, которые могут привести к деформации перемычки и нарушению симметричности работы торсиона.



Рис. 1. Типовые представители упругих подвесов

Это приводит к необходимости ручной доводки с минимальными натягами (давлениями притира) повторно-поочередно первого и второго отверстия с промежуточными промывками и контролем как размеров отверстий, так и жесткости перемычки, что существенно увеличивает трудоемкость и не гарантирует требуемой точности. Задача может быть решена путем одновременной доводки отверстий, поскольку в этом случае съем материала с перемычки будет происходить симметрично, а радиальные давления притиров – компенсироваться, что исключит ее деформации. Однако механическая доводка одновременно двух от-

верстий в подвесе невозможна из-за отмеченного выше их близкого расположения, а значит – и притиров, что не позволяет разместить в данном пространстве какой-либо привод. Электрохимическая доводка одновременно двух отверстий не дала положительных результатов вследствие насыщения материала перемычки водородом с образованием гидридов, что при ее малой толщине приводило к разрушению.

Нами предложено использовать для одновременного вращения притиров известную схему ультразвукового привода с разработкой специального волновода, обеспечивающего синхронное воздействие на оба притира. При этом должно быть обеспечено не только вращение притиров, но и сообщение им ультразвуковых колебаний для интенсификации процесса. Это может быть достигнуто применением волновода с клиновым вырезом на торце, охватывающем оба притира (рис. 2).

Целью исследований явилось теоретико-экспериментальное обоснование возможности одновременной ультразвуковой доводки близкорасположенных отверстий в упругих подвесах, обеспечивающей повышение эффективности и точности процесса.

Крутящий момент на валике, на который воздействует тангенциальная периодическая сила колебаний волновода, равен:

$$M_{KP} = P_{\tau} R, \quad (1)$$

где P_{τ} – тангенциальная сила; R – радиус валика в точке контакта с поверхностью волновода.

Из рис. 2 следует, что

$$P_{\tau} = P \cos \frac{\alpha}{2},$$

где P – усилие, передаваемое поверхностью волновода на валик при возбуждении ультразвуковых колебаний; α – угол между гранями волновода.

Для условий вращения валика наилучшим случаем является $\alpha = 0$, тогда $P_{\tau} = P$. Однако в этом случае будет отсутствовать нормальная составляющая силы P_N , благодаря которой ультразвуковые колебания передаются валику, и процесс доводки будет мало интенсивным.

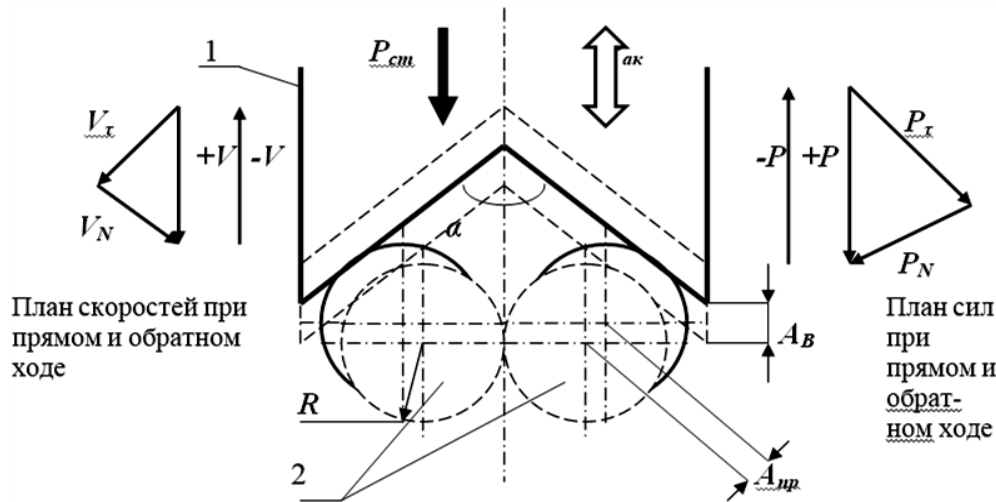


Рис. 2. Расчетная схема взаимодействия волновода 1 с притирами 2

В свою очередь, очевидно, что сила $P = P_{ак} = P_m \cos(2\pi ft)$, где P_m – амплитудное значение динамической силы; f – частота колебаний волновода, t – время.

Согласно работам А.И. Маркова [1] динамическая сила приближенно может быть определена следующим образом:

$$P_m \approx 4P \text{ или } P_m = 1,66A^{0,56}, \quad (2)$$

где A – амплитуда колебаний.

Из (2) с учетом (1) следует, что для увеличения крутящего момента на валике-притире необходимо увеличивать силу прижатия к нему волновода. Однако это возможно до определенного предела. Ограничение накладывается изгибной прочностью валика и возрастанием сил трения в опорах, которые оказывают тормозящее действие на притиры.

Амплитуда колебаний притиров будет определяться периодическим их прогибом под действием динамической силы по известному из сопротивления материалов выражению:

$$A = \frac{4P \sin \frac{\alpha}{2} l^3}{48 E J}, \quad (3)$$

где A – прогиб валика (в нашем случае – амплитуда его изгибных колебаний); l – расстояние между опорами валика;

$J = \frac{\pi d^4}{64}$ – момент инерции сечения валика; E – модуль Юнга материала валика; d –

диаметр валика на участке между опорами, контактирующими с поверхностью грани волновода.

Из выражения (3) следует, что при больших значениях α амплитуда колебаний притиров будет большей, однако, при этом уменьшится крутящий момент и частота вращения валиков-притиров согласно (1).

Частота вращения притиров может быть определена из известных выражений кинематики и техники ультразвука:

$$n = \frac{1000V}{\pi d}, \quad V = V_{ак}, \quad V_{ак} = \pi fA, \quad (4)$$

где V – окружная скорость валика; $V_{ак}$ – средняя тангенциальная составляющая колебательной скорости торца волновода.

Диапазон отверстий, обрабатываемых по предложенной схеме, может быть определен из очевидных выражений:

$$M_{кр} > M_{тр} \text{ или } 4P \cos(2\pi ft)R > F_{тр} R,$$

$$4P \cos(2\pi ft) > pS f_{тр},$$

$$4P \cos(2\pi ft) > p\pi dl f_{тр},$$

где S – площадь поверхности отверстия, контактирующего с притиром, которую принимаем равной всей площади поверхности отверстия, так как в предлагаемой схеме притир не совершает возвратно-поступательного движения, а однократно вводится в отверстие на всю длину.

Тогда при заданном диаметре доводимого отверстия d длина отверстия будет определяться следующим образом:

$$l \leq 4P \cos(2\pi ft) / \rho \pi d f_{mp}. \quad (5)$$

В приведенных выражениях l – длина контакта отверстия и притира; p – давление притира на стенки отверстия, определяемое соотношением их диаметров и толщиной слоя доводочной пасты (обычно давление при доводке принимают равным 7×10^4 Н/м²); f_{mp} – коэффициент трения (для случая контакта поверхностей через слой абразива он равен 0,56).

Исследование проводили на ультразвуковой установке с пьезокерамическим преобразователем на двух пьезокерамических элементах ЦТС-19 с питанием от ультразвукового генератора УЗГ-И производства ООО «Ультразвук ТЕО» г. (Саратов) мощностью 250 Вт. Резонансная частота преобразователя равна 22,7 кГц. В выходной ступени излучающей накладки преобразователя закрепляли сменные волноводы с углами наклона граней 120°, 90° и 60°. На столе установки закрепляли оснастку (рис. 4 б), в которой размещали гладкие стержневые притиры из стали 40Х13 с диаметрами рабочей части 2,0 мм и хвостовиками 1,8 мм.

Эксперименты проводили в два этапа. На первом этапе определяли влияние параметров устройства: угла наклона граней

волновода, усилия прижима и акустической мощности на частоту вращения притиров и ее постоянство для первого и второго притира. Мощность регулировали изменением напряжения на задающем контуре генератора в диапазоне 5-15 В. Контроль частоты вращения проводили при помощи бесконтактного оптического датчика оборотов ВС 401 и регистрирующей системы, входящих в виброакустический комплекс ВК-01 производства ЗАО «Электронные технологии и метрологические системы» (г. Зеленоград).

Частота вращения левого и правого притиров различается в большей степени на холостом ходу (соответственно 1340 и 960 об/мин) и в меньшей степени под нагрузкой (768 и 670 об/мин). В последнем случае неравномерность вращения составляет 14%, что вполне допустимо. Неравномерность вращения, очевидно, связана с различными условиями контакта граней волновода и притиров вследствие неточности изготовления и базирования.

Зависимости частоты вращения притиров от угла между гранями волновода, напряжения на силовом контуре генератора и отклонения частоты от резонансного значения представлена на рис. 3 и 4.

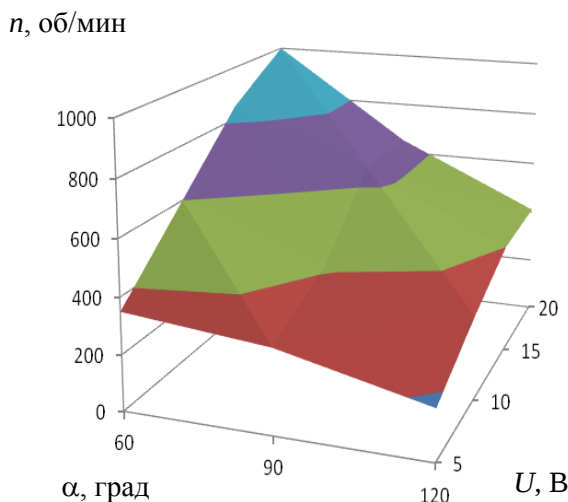


Рис. 3. Влияние напряжения в выходном контуре и угла между гранями волновода на частоту вращения притиров при частоте колебаний 22,7 кГц

Видно, что с увеличением угла между гранями волновода снижения частоты вра-

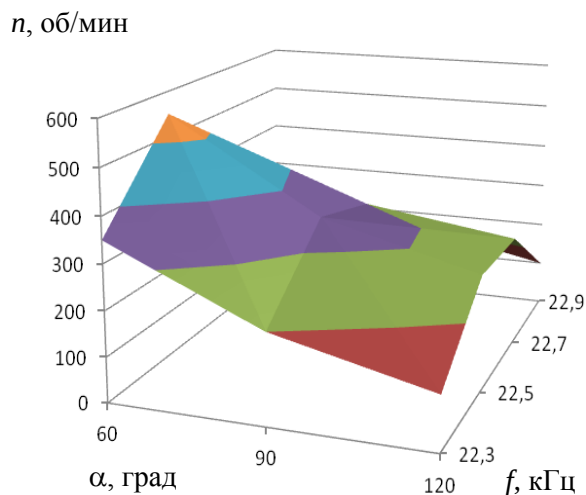


Рис. 4. Влияние частоты колебаний и угла между гранями волновода на частоту вращения притиров при напряжении 5 В

щения более существенно при больших напряжениях в контуре генератора, то есть

при больших амплитудах. С другой стороны, увеличение напряжения (акустической мощности, амплитуды) в большей степени влияет на рост частоты вращения, чем уменьшение угла между гранями. Повидимому, это связано с тем, что при увеличении угла между гранями растет давление на поверхность валика, что хотя и приводит к улучшению контакта и вращающего момента, одновременно вызывает повышение давления в опорах, рост трения и момента сопротивления вращению. При резонансной частоте колебаний наблюдается наибольшая частота вращения валика, что объясняется наибольшим значением амплитуды в условиях резонанса. С другой стороны, изменение частоты относительно резонансной всего на 400 Гц (на 1,8%) приводит к снижению частоты вращения с 500 до 380 об/мин и с 200 до 100 об/мин в зависимости от угла между гранями волновода, то есть на 24-50%. Это позволяет просто регулировать режимы доводки в достаточно широких пределах.

На втором этапе определяли кинетику съема материала в первом и втором отверстиях. При этом проводили измерение диаметра отверстия на микроскопе УИМ-

23 до обработки и через каждую минуту доводки. Условия эксперимента: усилие прижатия волновода к притирам 5-7 Н (обеспечивалось регулируемым подпружиненным столом установки), диаметр отверстия 2 мм, длина отверстия 8 мм, доводочная паста зернистостью М 7/14, материал образцов – сталь ШХ-15 с твердостью 48-50 HRC_Э.

В процессе эксперимента изменяли время доводки от 1 до 3 минут и частоту вращения притиров от 50 до 800 об/мин. Как показывает анализ графика, построенного по результатам пяти повторных опытов (рис. 5), рост съема практически прекращается при увеличении частоты вращения притиров более 300 об/мин. Это позволяет использовать на резонансных частотах приводной волновод с углом между гранями 90° (см. рис. 3 и 4), что обеспечит достаточную величину амплитуды колебаний притиров при невысокой частоте их вращения, то есть при малых ударных нагрузках на переключку. Зависимость величины съема от времени доводки определяли при частоте вращения притиров 100 об/мин на резонансной частоте системы.

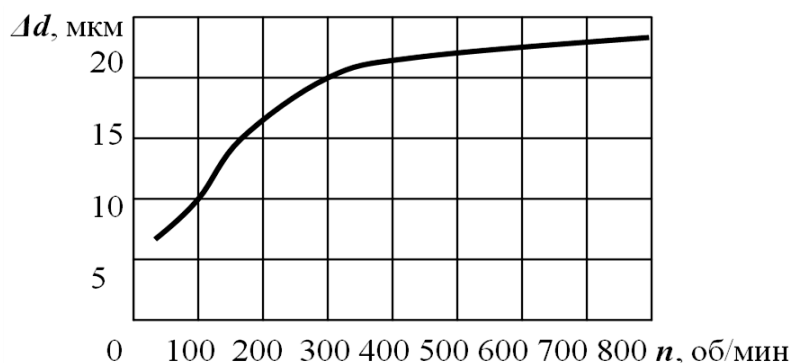


Рис. 5. Зависимость съема материала в отверстии от частоты вращения притира

Установлено, что эта зависимость близка к параболической, при этом изменение диаметра отверстия составило через 1 минуту доводки 10 мкм, через 3 минуты – 30 мкм. Стабильность получения размера отверстий (фактически – толщины переключки) оценивали по равномерности съема в партии образцов при доводке на оптимальных режимах работы колебательной

системы в течение 1 минуты. Обработали 42 отверстия, то есть 21 переключку, измеряя уменьшение толщины переключки.

График (рис. 6) показывает, что распределение величины изменения толщины переключки близко к нормальному закону распределения. При этом в допуск ± 2 мкм укладывается 19 переключек из 21, что составляет 91%.

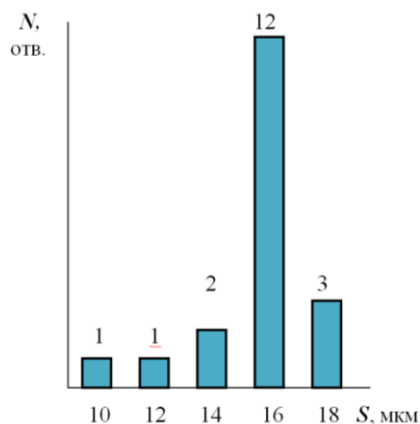


Рис. 6. Распределение изменения толщины перемычки S в партии деталей N

Для определения кинетики съема материала проводили доводку пары отверстий в течение 7 минут. Съем замеряли каждые 30 с, а абразивную пасту подавали в зону обработки через 2 мин. Этот момент на графике (рис. 7) отмечен пиками съема, связанными с обновлением режущих зерен между притиром и стенками отверстия. Из графика можно заключить, что максимальная интенсивность съема при ультразвуковой доводке неразжимными притирами-валиками наблюдается в

первые 1,5-2 минуты доводки, а затем резко снижается, что связано со снижением давления притира вследствие постепенного увеличения диаметра отверстия и одновременного уменьшения диаметра притира при доводке.

Итак, теоретические и экспериментальные исследования ультразвукового устройства для одновременной доводки близкорасположенных отверстий в упругих подвесах позволяют сделать следующие выводы.

1. Увеличение амплитуды колебаний в 3 раза дает при одном и том же усилии прижима волновода увеличение частоты вращения шпинделя при $\alpha = 120^\circ$ в 1,5 раза, при $\alpha = 90^\circ$ в 2,5 раза, при $\alpha = 60^\circ$ в 3,1 раза. При этом вращающий момент возрастает соответственно на 64, на 66 и на 72%.

2. Увеличение усилия прижима волновода в 3 раза при одной и той же амплитуде колебаний приводит к снижению частоты вращения при $\alpha = 120^\circ$ в 2,8 раза, при $\alpha = 90^\circ$ в 1,87 раза, при $\alpha = 60^\circ$ в 1,6 раза. При этом вращающий момент возрастает соответственно в 3, в 2,5 и в 1,5 раза.

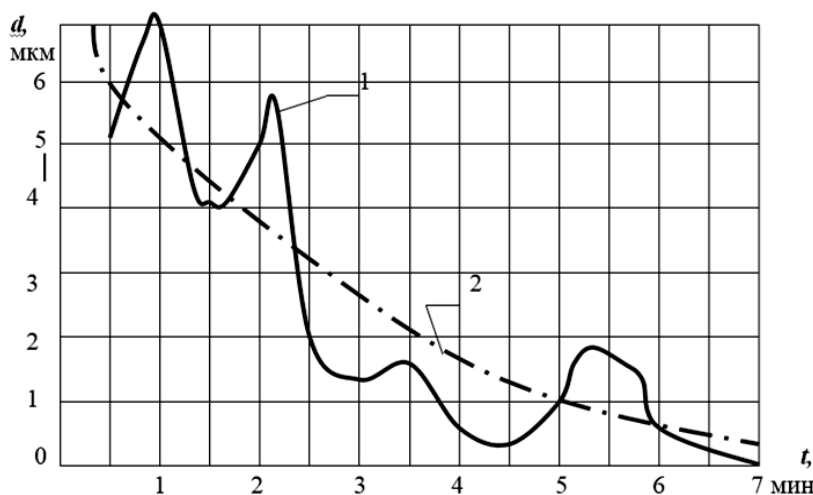


Рис. 7. Кинетика минутного съема материала в отверстии в течение 7 минут доводки: 1 – фактическая экспериментальная зависимость, 2 – сглаженная зависимость

3. При максимальном угле наклона грани волновода усилие прижима в наибольшей степени влияет на изменение вращающего момента, а увеличение амплитуды в большей степени влияет на частоту вращения. При угле между гранями волновода

60° наибольшее влияние на частоту вращения и величину крутящего момента оказывает амплитуда.

4. По критериям наибольшей частоты вращения и наибольшего вращающего момента оптимальным является угол между

гранями волновода, равный 90° . При таком угле разработанное устройство обеспечивает при частоте колебаний волновода порядка 22 кГц, амплитуде 5 мкм и усилии прижима волновода 5-7 Н частоту вращения притиров на холостом ходу около 1300 об/мин, под нагрузкой – до 800 об/мин

с разностью частот для первого и второго притиров не более 14%.

5. Разработанное устройство позволяет осуществлять механизированную доводку близкорасположенных отверстий с точностью 2 мкм и производительностью не менее 7-10 мкм/мин.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Марков А.И.** Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов / А.И. Марков. М.: Машиностроение, 1968. 367 с.

2. **Бржозовский Б.М.** Ультразвуковые технологические процессы и оборудование в машино- и приборостроении / Б.М. Бржозовский, Н.В. Бекренев. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2009. 348 с.

Мулдашева Гузель Канаткалиевна – аспирант кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Guzel K. Muldasheva – Postgraduate, Department of Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Злобина Ирина Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Irina V. Zlobina – PhD, Associate Professor, Department of Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Бекренев Николай Валерьевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Nilai V. Bekrenev – Dr.Sc., Professor, Head: Department of Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 01.06.18, принята к опубликованию 20.06.18

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах. В связи с этим просим вас при направлении статьи в редакцию сообщать:

1. Полные имена и отчества всех авторов.
2. Место работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять краткий (4-5 предложений) реферат на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ИСТОЧНИКА СВЧ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

М.А. Фурсаев

DESIGN FEATURES OF A MICROWAVE POWER SOURCE FOR APPLYING FORCE TO DIELECTRIC MATERIALS

M.A. Fursaev

Рассмотрены особенности построения энергетической части оборудования для осуществления силового воздействия СВЧ энергии на диэлектрические материалы. При ее построении предложено использовать генератор с внешней обратной связью. В состав обратной связи входят камера, выполненная в виде проходного резонатора, и амплитрон как источник СВЧ энергии.

Ключевые слова: силовое воздействие, СВЧ энергия, диэлектрический материал, обратная связь, амплитрон, проходной резонатор

В работе [1] показана возможность повышения качества полимерных материалов при кратковременном (в течение 6-100 с) воздействии СВЧ электромагнитного поля, при котором за счет конформационных изменений структуры достигается изменение их физико-механических свойств. При этом установлено, что основным фактором, влияющим на изменение свойств материала, является электрическая компонента СВЧ электромагнитного поля. Такое воздействие в [1] названо «нетепловым» (в отличие от теплового воздействия СВЧ электромагнитного поля на диэлектрические материалы, используемого в традиционных устройствах СВЧ нагрева). Оно ниже будет называться «силовым», поскольку это, по мнению автора, уточняет характер воздействия.

Экспериментальные исследования в [1] проводились с использованием камер ре-

The article considers design features of a power generating component of a device utilized to apply the microwave power force to dielectric materials. For design purposes, it is suggested to use a generator with an external feedback. The feedback structure includes a chamber having the form of a reentrant resonator and an amplitron used as a source of microwave energy.

Keywords: force, microwave energy, dielectric material, feedback, amplitron, reentrant resonator

зонаторного типа установок теплового воздействия СВЧ поля, для которых характерны небольшие величины добротности, а следовательно, весьма низкие значения напряженности электрического поля. Кроме того, при формируемой структуре СВЧ электромагнитного поля в таких камерах весьма трудно определить вид колебаний, с электрической компонентой которого связано изменение структуры материала. Из этого следует необходимость продолжения работ по экспериментальному исследованию силового воздействия СВЧ электромагнитного поля на материалы, и не только полимерные, которые должны проводиться при использовании специального оборудования.

В настоящей работе рассматриваются особенности функционирования энергетической части оборудования, которое может использоваться при эксперимен-

тальных исследованиях силового воздействия на диэлектрические материалы, и возможные варианты схемы его построения. Полагается, что в состав энергетической части оборудования входят камера, в которую помещается материал, подвергаемый воздействию СВЧ электромагнитного поля, и источник СВЧ энергии. Очевидно, при положительных результатах выполненных исследований опыт эксплуатации лабораторных образцов оборудования может быть полезен при разработке промышленного оборудования.

В камере при силовом воздействии СВЧ электромагнитного поля на материал должен преобладать определенный вид колебаний с электрической компонентой, воздействующей на этот материал, и должна обеспечиваться высокая напряженность электрического поля, что может быть получено при высокой добротности камеры. Для исключения возможности пробоя при высокой напряженности электрического поля воздействие должно осуществляться короткими импульсами. Кроме того, импульсный характер воздействия способствует повышению его эффективности. Поэтому для обеспечения работы источника СВЧ энергии в таком режиме должен использоваться модулятор.

Необходимым условием функционирования оборудования для осуществления силового воздействия на диэлектрические материалы в камере с высокой добротностью является равенство частоты, генерируемой источником СВЧ энергии, и резонансной частотой камеры, так как при отличии частот существенно уменьшается напряженность электрического поля. При наличии в камере образца материала, подлежащего воздействию СВЧ электромагнитного поля, ее резонансная частота зависит от типа материала, массы образца, а также от места его положения в камере. Поэтому в оборудовании должен использоваться источник СВЧ энергии с перестройкой частоты.

При кратковременном воздействии СВЧ электромагнитного поля на материал температура исследуемого образца не изменяется. Однако при изменении структуры ма-

териала может измениться его диэлектрическая постоянная, а следовательно, и резонансная частота камеры при наличии в ней исследуемого образца материала. В этом случае имеет значение свойство источника СВЧ энергии, обеспечивающего автоматическое изменения генерируемой частоты с изменением резонансной частоты резонатора.

Простейшей представляется схема построения энергетической части оборудования для осуществления силового воздействия СВЧ электромагнитного поля на диэлектрические материалы, которая используется при построении традиционных устройств СВЧ нагрева. Она приведена на рис. 1. Ее основными элементами являются камера для материала, подлежащего воздействию СВЧ электромагнитного поля, источник СВЧ энергии, работающий в импульсном режиме, и модулятор, обеспечивающий работу источника СВЧ энергии в таком режиме.



Рис. 1. Простейшая схема построения энергетической части оборудования для осуществления силового воздействия СВЧ электромагнитного поля на диэлектрические материалы: 1 – камера, 2 – источник СВЧ энергии, 3 – модулятор

Поскольку перестройка генерируемой частоты осуществляется оператором, получение полного совпадения частоты генератора и резонансной частоты камеры весьма затруднено. Еще более сложной задачей является обеспечение автоматической перестройки частоты в процессе воздействия СВЧ электромагнитного поля на образец материала. С этим связаны недостатки схемы построения оборудования, приведенной на рис. 1.

Они устраняются при использовании схемы, в которой источником СВЧ энергии является амплитрон, усилитель магнетронного типа [2], а камера выполнена как проходной резонатор, имеющий вход и выход. Эти элементы соединены так, что формируется генератор на усилителе с внешней

обратной связью, генерируемая частота которого будет совпадать с резонансной частотой проходного резонатора. Таким образом, частота такого генератора будет изменяться вслед за изменением резонансной частоты резонатора.

Такое изменение генерируемой частоты является результатом постоянства суммарной электрической длины обратной связи при происходящем изменении резонансной частоты резонатора. Это объясняется тем, что у замедляющей системы амплитрона дисперсия аномальная, а у передающих систем других элементов генератора – нормальная. Системы с нормальной и аномальной дисперсией имеют противоположную зависимость длины волны в системе от частоты. Таким образом, при изменении частоты, например, увеличение электрической длины замедляющей системы амплитрона компенсируется уменьшением электрической длины другого участка цепи обратной связи.

Использование амплитрона в схеме источника СВЧ энергии с автоматической перестройкой частоты было предложено в [3] для возбуждения микротрона, ускорителя электронов. Дело в том, что в процессе ввода микротрона в режим происходит разогрев резонатора, в результате чего его резонансная частота непрерывно изменяется. Поэтому оператору приходится непрерывно подстраивать генерируемую частоту, что существенно усложняет процесс.

Предложения в работе [3] были реализованы в СГУ при построении схемы возбуждения микротрона, представленной на рис. 2 [4]. Она обеспечивала ввод в режим микротрона без участия оператора. В цепь обратной связи (рис. 2) кроме резонатора, выполненного как проходной резонатор, и амплитрона дополнительно введены ферритовая развязка и фазовращатель. Анодное питание амплитрона осуществляется модулятором. Предварительной регулировкой фазовращателя достигается электрическая длина обратной связи, необходимая для работы генератора. Последующие вводы в режим осуществляются без дополнительной регулировки фазовращателя.

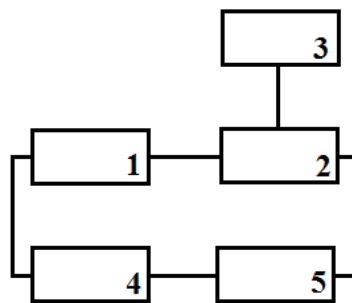


Рис. 2. Схема построения энергетической части оборудования для осуществления силового воздействия СВЧ электромагнитного поля, в котором камера и амплитрон охвачены цепью обратной связи: 1 – камера, 2 – амплитрон, 3 – модулятор, 4 – ферритовая развязка, 5 – фазовращатель

Представленные в [4] данные, подтверждающие обеспечение схемой, показанной на рис. 2, автоматического изменения генерируемой частоты вслед за изменением резонансной частоты резонатора, позволяют делать прогноз об аналогичном ее действии при исследовании силового воздействия СВЧ электромагнитного поля на диэлектрические материалы. При этом смена одинаковых образцов одного материала, либо образцов разных материалов с близкими параметрами не требует дополнительной регулировки фазовращателя.

Камера в схеме рис. 2 входит в состав цепи обратной связи. Поэтому условия работы устройства, использующего эту схему, и в частности, режим работы в ней амплитрона, зависят от параметров образца материала, помещаемого в камеру, поскольку от них зависит значение коэффициента передачи напряжения в цепи обратной связи. Оценку этой зависимости режима работы амплитрона можно провести на базе его аналитической модели [2]. Так, на рис. 3 приведены результаты расчета зависимости выходной мощности амплитрона при работе в схеме рис. 2 от анодного тока для ряда значений модуля коэффициента передачи напряжения по цепи обратной связи χ_u . Максимальные величины токов для значений $\chi_u = 0,33$ и $\chi_u = 0,5$ соответствуют режиму срыва работы прибора. Проведенная через точки, соответствующие этим токам, пунктирная линия является

границей, ниже которой невозможна работа источника СВЧ энергии, использующего эту схему.

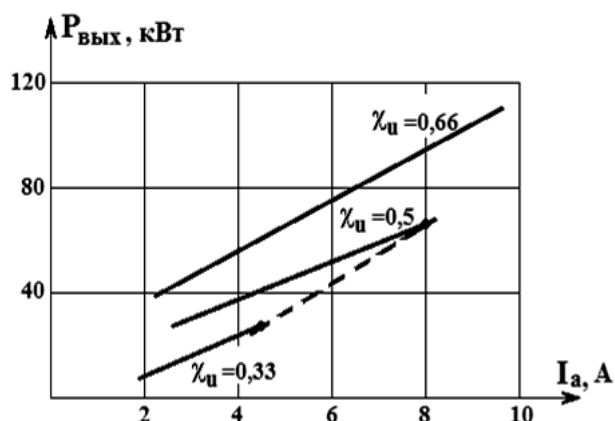


Рис. 3. Расчетные зависимости мощности на выходе амплитрона в схеме рис. 2 от анодного тока для ряда значений модуля коэффициента передачи напряжения χ_u

При анализе данных расчета следует иметь в виду, что параметром режима работы амплитрона является его анодный ток, а в состав цепи обратной связи кроме камеры входит ряд пассивных элементов, в том числе ферритовая развязка и фазовращатель. Как видно, при фиксированном зна-

чении анодного тока уменьшение коэффициента χ_u сопровождается не только уменьшением мощности на выходе амплитрона, но и срывом его работы.

Из изложенного выше следует, что при проведении исследований влияния силового воздействия СВЧ электромагнитного поля на диэлектрические материалы целесообразно использовать энергетическую часть оборудования, основой построения которого является схема, приведенная на рис. 2. Элементный состав цепи обратной связи этой схемы должен выбираться с учетом обеспечения требуемого уровня мощности на входе камеры и устойчивой работы амплитрона. Кроме того, следует иметь в виду, что величина изменения резонансной частоты резонатора, при которой обеспечивается автоматическое изменение частоты, генерируемой используемым источником СВЧ энергии, ограничена. Для ее увеличения необходим подбор величин параметров элементов цепи обратной связи в части обеспечения оптимального соотношения электрических длин ее участков с нормальной и аномальной дисперсией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калганова С.Г. Электротехнология нетепловой модификации полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле: дис. ... д-ра техн. наук / С.Г. Калганова. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2009. 356 с.
2. Цейтлин М.Б. Сверхвысокочастотные усилители со скрещенными полями / М.Б. Цейтлин, М.А. Фурсаев, О.В. Бецкий. М.: Сов. радио, 1978. 279 с.

3. Капица С.П. Микротрон / С.П. Капица, В.Н. Милехин. М.: Наука, 1969. 211 с.
4. Микротрон на 12 МЭВ с СВЧ системой на платинотроне / И.В. Алексеев, Н.В. Владимиров, В.П. Горбачев и др. // Труды 8-го совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1983. Т. 2. С. 41-43.

Фурсаев Михаил Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника и электроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Mikhail A. Fursaev – Dr.Sc., Professor. Department of Electrical Engineering and Electronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.06.18, принята к опубликованию 20.06.18

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ КОНСОЛИДАЦИЯ ТОНКОЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В.Н. Хмелёв, А.Н. Сливин, А.Д. Абрамов

ULTRASONIC CONSOLIDATION OF THIN METAL FOILS FOR ADDITIVE TECHNOLOGIES

V.N. Khmelev, A.N. Slivin, A.D. Abramov

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, по ультразвуковой консолидации тонколистовых металлов. Проведенные теоретические исследования позволили изучить влияние таких параметров, как предел текучести, модуль сдвига, частота ультразвуковых колебаний, и определить величину ультразвуковой энергии с учетом потерь, необходимой для консолидации двух листов тонколистовых металлов, таких как медь, алюминий, титан. Практически реализованный стенд, для консолидации тонколистовых металлов методом ультразвуковой сварки, позволил исследовать влияние основных параметров процесса, таких как усилие прижима тонколистовых металлов к сварочному инструменту, время ультразвукового воздействия, амплитуда ультразвуковых колебаний на прочность формирования соединения тонколистовой меди.

Ключевые слова: ультразвук, сварка, консолидация, металлы, стенд, оптимизация

Ультразвуковая сварка является одним из наиболее эффективных способов соединения изделий, изготавливаемых из полимеров и металлов. В связи с развитием аддитивных технологий ультразвуковая сварка может стать перспективным направлением соединения тонколистовых металлов.

Возможность ее применения для получения однородных материалов обусловлена возможностью формирования сварного соединения отличающихся по свойствам и толщине металлов. При этом сварка реализуется без предварительной подготовки по-

The article presents the results of theoretical and pilot studies relating ultrasonic consolidation of thin metal foils. The given theoretical research allowed us to analyze the influence of such parameters as the yield point, rigidity modulus, frequency of ultrasonic oscillations, and to determine the size of ultrasonic energy in terms of the losses, which is necessary for consolidation of two sheets of thin metal, such as copper, aluminum, and titanium. The test bench designed for consolidation of thin metal foils using the method of ultrasonic welding, allowed us to investigate influence of the key parameters of the process, such as the hold-down pressure of thin metal foils to the welding tool, the time span of the ultrasonic impact, the amplitude of ultrasonic oscillations for the ability to join thin copper plates together.

Keywords: ultrasound, welding, consolidation, metals, stand, optimization

верхностей, без снятия оксидных плёнок и загрязнений.

Применение современных способов управления ультразвуковыми аппаратами для сварки тонколистовых металлов позволяет реализовать управление энергетикой процесса [1, 2], вводить определенное количество энергии, достаточное для формирования качественных сварных швов при соединении различных металлов.

Ультразвуковая сварка металлов основана на использовании энергии механических колебаний, формируемых в сваривае-

мых материалах сварочным инструментом колебательной системы, совершающим возвратно-поступательное движение с ультразвуковой частотой 15-50 кГц и амплитудой до 100 мкм.

При этом энергия ультразвуковых колебаний вводится в свариваемые металлы из сварочного инструмента при обеспечении статического сварочного усилия прижима сварочного инструмента к поверхности листов. Процесс формирования сварного соединения тонколистовых металлов между собой происходит за счёт возникающих в металлах знакопеременных напряжений и деформаций, а также в результате сложного взаимодействия множества различных явлений, возникающих под воздействием ультразвуковых колебаний:

- уплотнение микро- и макронеровностей на поверхности свариваемых металлов и сварочного инструмента;

- механическое удаление и выгорание окислов и оксидных плёнок на внешней поверхности тонколистовых металлов;

- сближение свариваемых поверхностей на близкие к межатомным расстояния за счёт обеспечения статического сварочного усилия прижима;

- повышение температуры и пластичности металлов в зоне сварки за счёт процессов деформации и трения с высокой частотой;

- консолидация локальных участков сварного шва на микро- и макроуровнях.

Основная часть энергии, выделяемой в зоне сварки, обуславливается процессами внешнего и внутреннего трения. При этом внешнее трение определяется основным источником энергии ультразвуковых колебаний – сварочным инструментом. Величина энергии ультразвуковых колебаний, выделяемой в свариваемых материалах, зависит от параметров ультразвукового воздействия – амплитуды и частоты колебаний, механических и термических свойств материалов и влияет на знакопеременные напряжения и деформации, которые возникают в свариваемых материалах в зоне сварки. В результате упругопластической деформации происходит активация поверхностного слоя металлов, механическое уда-

ление и выгорание оксидных плёнок, молекулярное адгезионное сцепление. Ультразвуковое воздействие обеспечивает в однородную структуру, то есть консолидацию тонких слоев металлов.

При этом сварка происходит на локальных участках сварного шва, и консолидация материалов происходит последовательно, сначала в тех зонах, где максимальный контакт и максимальное выделение энергии, повышение температуры, и, как следствие, повышение пластичности металлов.

Процессы внутреннего трения в настоящее время являются малоизученными. Однако, очевидно, что в результате повышения пластичности происходит ряд явлений (движение дислокаций, включений, зерен и т.п.), влияющих на образование однородного соединения (сварного ультразвукового шва). Диффузионно-вязкая ползучесть кристаллических структур оказывает влияние на процесс внутреннего трения и формирование сварного шва. Таким образом, основной вклад в величину вводимой в соединяемые металлы энергии вносят процессы внешнего трения сварочного инструмента и тонколистовых металлов.

Для выявления оптимальных условий и режимов реализации консолидации тонколистовых металлов с помощью ультразвуковой сварки необходимо решить следующие частные задачи.

1. Построить модель процесса формирования соединения, провести анализ процесса для выявления значений ультразвуковой энергии, необходимой и достаточной для формирования сварного шва определенных размеров для различных тонколистовых металлов.

2. Для подтверждения возможности практической реализации процесса консолидации провести экспериментальные исследования процесса ультразвуковой сварки тонколистовых металлов.

3. Основываясь на результатах теоретических и экспериментальных исследований, определить оптимальные параметры ультразвукового воздействия для формирования сварного шва определенных размеров для различных тонколистовых металлов.

Теоретические исследования были проведены для различных по свойствам тонколистовых металлов. В качестве объектов исследований были выбраны наиболее ча-

сто применяемые металлы, такие как медь, алюминий, титан.

В табл. 1 представлены основные физические свойства исследуемых материалов [3].

Таблица 1

Физические свойства исследуемых материалов

Материал	Предел текучести $\sigma_m \cdot 10^6$, Н/м ²	Модуль сдвига $G \cdot 10^{10}$, Н/м ²	Температура плавления T , °С	Теплоемкость C , Дж/кг°С	Удельная теплота плавления $\lambda \cdot 10^5$, Дж/кг	Плотность ρ , кг/м ³
Медь	115	4,55	1083	400	2,1	8900
Алюминий	55	2,6	660	920	3,9	2712
Титан	310	4,14	1668	530	3,1	4500

Целью проведения теоретических исследований было определение значений тепловой и ультразвуковой энергий, необходимых для нагрева и расплавления определенного участка металлических листов, соответствующего месту формирования сварного шва.

На рис. 1 представлена модель процесса формирования шва (схема стенда для экс-

периментальных исследований), на которой показано, как осуществляется ввод ультразвуковых колебаний в свариваемые металлы [4]. Толщина сварного шва устанавливалась равной 100 мкм, ширина сварного шва $2,5 \cdot 10^{-3}$ м, длина сварного шва $5 \cdot 10^{-3}$ м, площадь формируемого сварного шва $12,5 \cdot 10^{-6}$ м.

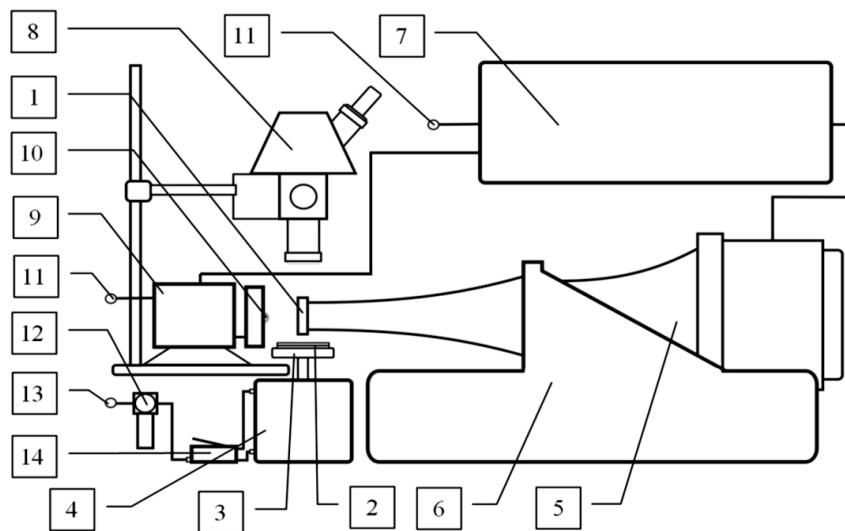


Рис. 1. Структурная схема стенда для проведения экспериментальных исследований

При проведении анализа процесса распространения колебаний для предварительной оценки величины энергии осуществлялся расчёт значения тепловой энергии, необходимой для нагрева зоны сварки до температур плавления участка металлов, соответствующего сварному шву:

$$Q_1 = c \rho \Delta T V_1, \quad (1)$$

где c – теплоемкость; ΔT – разность между температурой плавления и комнатной температурой; ρ – плотность; V_1 – объем зоны нагрева.

Энергия, необходимая для расплавления участка металлических листов Q_2 , энергия

тепловых потерь Q_3 вне зоны сварки и общая энергия Q равны:

$$Q_2 = \lambda \rho V_2, \quad (2)$$

$$Q_3 = c \rho \Delta T V_3, \quad (3)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (4)$$

где λ – удельная теплота плавления; V_2 – объем зоны плавления в материалах; V_3 – объем зоны тепловых потерь.

Известны результаты теоретических исследований процесса ультразвукового воздействия на поверхность металлов, позволившие установить зависимость между амплитудой деформации поверхности металлов и свойствами металлов, параметрами ультразвуковых колебаний (амплитудой и частотой), а также зависимость скорости выделения энергии ультразвуковых колебаний (скорость диссипации) в зоне сварки металлов [5]. Особое внимание при этом было уделено влиянию процессов ультразвукового трения рабочей поверхности сварочного инструмента на скорость выделения ультразвуковой энергии в процессе воздействия.

Установленная взаимосвязь таких параметров и свойств материалов, как предел текучести, модуль сдвига, частота и ампли-

туда механических ультразвуковых колебаний, позволяет определять скорость диссипации энергии ультразвуковых колебаний в зоне сварки

$$P_{св} = (4 \div 9) \frac{f \sigma_m^2 \delta S_{св}}{G}, \quad (5)$$

где f – частота, c^{-1} ; σ_m – предел текучести, H/m^2 ; G – модуль сдвига, H/m^2 ; δ – толщина зоны формирования сварного шва, m ; $S_{св}$ – площадь сварного шва, m^2 .

Учитывается, что колебания сварочного инструмента направлены тангенциально к поверхности свариваемых материалов и вызывают механические деформации и сдвиг локальных участков материалов в зоне сварки с ультразвуковой частотой.

В табл. 2 представлены результаты расчёта значений энергий, необходимых для формирования сварного шва двух, уложенных внахлест листов меди толщиной по 100 мкм.

Значение величины Q позволяет осуществлять оценку тепловой энергии, необходимой для формирования сварного шва. Потери энергии Q_3 учитывают рассеяние тепловой энергии вне зоны сварки в сварочный инструмент, в опору, в сами листы свариваемых материалов за зону сварки [2].

Таблица 2

Значения тепловых и ультразвуковой энергий для сварки различных по свойствам материалов

	Энергия на нагрев Q_1 , Дж	Энергия на плавление, Q_2 , Дж	Энергия потерь, Q_3 , Дж	Энергия сварки сумм. Q , Дж	Скорость диссипации энергии УЗ сварки $P_{св}$, Дж/с
Медь	4,7	2,3	153,8	160,8	59
Алюминий	2	1,3	107,8	111,1	23,6
Титан	4,9	1,7	103	109,6	471,2

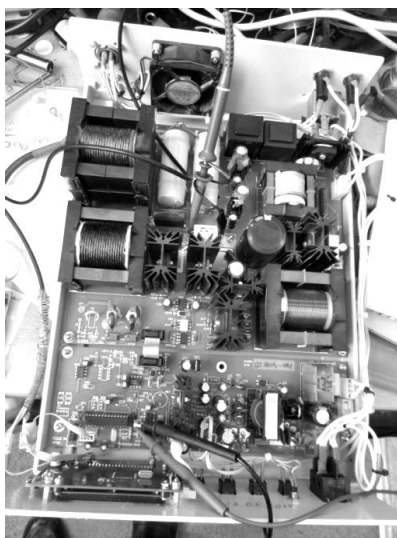
Скорость диссипации энергии ультразвуковых колебаний в зоне сварки $P_{св}$ позволяет оценить величину энергии, которую необходимо выделить в зоне шва при помощи ультразвуковых колебаний, для консолидации двух листов тонколистовых металлов толщиной по 100 мкм с площадью формируемого сварного шва $12,5 \cdot 10^{-6} m$. При этом скорость диссипации энергии ультразвуковых колебаний зависит от ме-

ханических свойств материалов, предела текучести, модуля сдвига, частоты ультразвуковых колебаний.

Для подтверждения правильности теоретического определения параметров сварки была разработана структурная схема и практически реализован стенд для проведения экспериментальных исследований по консолидации тонколистовых металлов методом ультразвуковой сварки (рис. 1, 2).

Экспериментальные исследования процесса ультразвуковой сварки осуществлялись для двух тонколистовых пластин из меди толщиной по 100 мкм. Введение ультразвуковой энергии в пластины осуществлялось при помощи сварочного инструмента 1. Пластины тонколистового металла 2 укладывались внахлест на стальную опору 3, которая при помощи пневмоцилиндра 4 обеспечивает статическое усилие прижима свариваемых пластин к сварочному инструменту (рис. 1).

В состав ультразвукового стенда для проведения исследований входит ультразвуковая пьезоэлектрическая колебательная система 5, жестко закрепленная на станине 6 в определенном месте для уменьшения влияния величины статического усилия прижима на демпфирование и уменьшение значения амплитуды ультразвуковых колебаний.



Электрическая энергия промышленной сети преобразуется в энергию ультразвуковых колебаний при помощи электронного блока ультразвукового генератора 7.

В состав электронного блока входят системы, необходимые для обеспечения определенных режимов работы ультразвукового оборудования. Это системы согласования колебательной системы с генератором и обратной связи, фазовой автоподстройки резонансной частоты, стабилизации амплитуды колебаний, задающий генератор, контроллер управления, система индикации, блоки питания. При проведении экспериментальных исследований осуществлялся контроль амплитуды колебаний сварочного инструмента в процессе ультразвукового воздействия на тонколистовые металлы.



Рис. 2. Стенд для исследований процесса ультразвуковой сварки металлов

Для контроля амплитуды использовался стробоскопический метод контроля [6], включающий применение микроскопа 8 со шкалой, имеющей цену деления 7 мкм, и блок электронного стробоскопа 9 с источником стробоскопического освещения 10, синхронизированный с электронным блоком ультразвукового генератора.

Блок электронного микроскопа и электронный блок ультразвукового генератора подключаются к промышленной сети 220 В 11. Для контроля значения статического усилия свариваемых пластин ме-

талла к поверхности сварочного инструмента использовался пневматический регулятор с манометром 12, подключаемый к пневмосети 13. Для обеспечения статического усилия прижима при помощи пневмоцилиндра использовалась пневмопедаль 14.

Для проведения экспериментальных исследований по определению прочности соединений были изготовлены специальные образцы, фото одного из которых представлено на рис. 3. Длина образцов составляла 150 мм, ширина 15 мм.

Для выявления оптимальных условий и режимов сварки были проведены экспериментальные исследования прочности сварных швов тонколистовых металлов на разрыв [7]. На рис. 4 представлен образец тонколистовой меди со сварным швом после проведения исследований прочности шва на разрыв.

В результате исследований были установлены режимы и условия формирования неравномерного по площади ввода ультразвуковых колебаний сварного шва. Схватывание и консолидация тонколистовых металлов меди происходит на локальных участках, примерно на 70-75% площади свариваемых пластин. Это было установлено при растяжении свариваемых тонких листов друг относительно друга и визуальном осмотре сформированного сварного шва.

Возможно неравномерное схватывание на локальных участках связано с наличием неровностей, отличием значений амплитуд деформации и сдвига в слоях металлов, приводящих к неравномерным значениям температур и возникновению неравномерной пластичности металлов.

Для выявления условий формирования шва с максимальной однородностью были исследованы образцы, полученные при различных режимах воздействия. Результаты испытаний позволили выявить наилучшие условия формирования швов. Эти результаты представлены в виде зависимости средней прочности сварных швов образцов в зависимости от значения статического усилия прижима свариваемых пластин к сварочному инструменту (рис. 5).

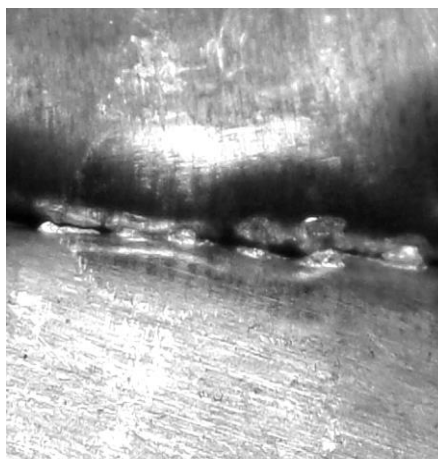


Рис. 3. Образец тонколистовой меди для проведения исследований и внешний вид сварного шва при растяжении сваренных листов друг относительно друга



Рис. 4. Образец тонколистовой меди со сварным швом после проведения исследований прочности соединения

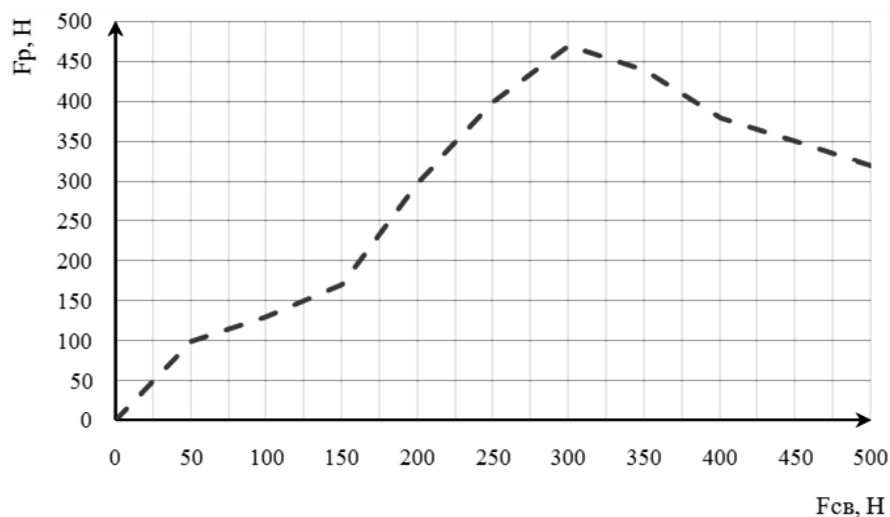


Рис. 5. Зависимость прочности сварного шва от значения статического усилия прижима тонколистовых металлов к сварочному инструменту

Установлено, что максимальная прочность сварных швов составляет 470 Н при обеспечении усилия прижима опоры и материалов к сварочному инструменту в процессе сварки, равного 300 Н, и обеспечении амплитуды продольных колебаний сварочного инструмента 75 мкм.

Дальнейшие экспериментальные исследования по обеспечению максимальной прочности сварных швов образцов позволили установить зависимость прочности получаемого сварного шва тонколистовых металлов от времени ультразвукового воздействия (рис. 6).

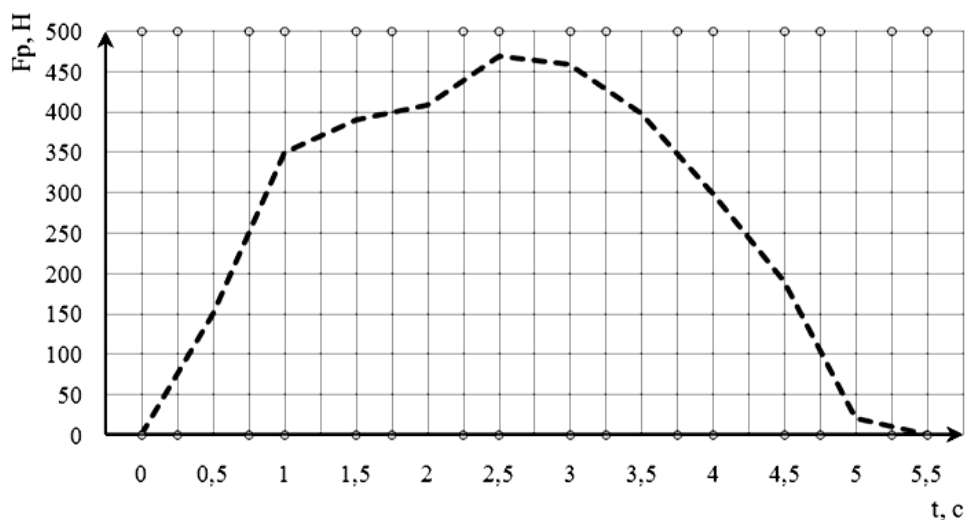


Рис. 6. Зависимость прочности сварного шва от значения времени ультразвукового воздействия

Оптимальное время ультразвукового воздействия для получения сварного шва двух листов тонколистовой меди толщиной по 100 мкм составило 2,5 секунды. При этом прочность сварных швов при проведении испытаний на разрыв в среднем составила 470 Н.

Установлено, что увеличение времени ультразвукового воздействия больше опти-

мального приводит к уменьшению толщины сварного шва, разрушению меди в зоне сварки и, как следствие, уменьшению прочности сварного шва.

При уменьшении времени ультразвукового воздействия величины ультразвуковой энергии было недостаточно, что приводило к образованию сварного шва недостаточной прочности.

Таким образом, результаты исследований позволили установить, что оптимальная скорость диссипации ультразвуковой энергии для двух листов меди должна составлять 59 Дж/с при воздействии в течение 2,5 секунд, что позволяет выделить в материалах 147,5 Дж энергии.

Это соответствует необходимому для образования сварного шва значению тепловой энергии.

В результате экспериментальных исследований установлено, оптимальное время ультразвукового воздействия для листов меди составляет 2,5 с, а оптимальное усилие прижима свариваемых материалов к рабочему инструменту составило 300 Н.

Проведенные теоретические исследования позволили изучить влияние таких параметров, как предел текучести, модуль сдвига, частота ультразвуковых колебаний. Были установлены оптимальные значения ультразвуковой энергии с учетом потерь, необходимой для консолидации двух листов тонколистовых металлов, таких как медь, алюминий, титан толщиной 100 мкм при площади формируемого сварного шва $12,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

Для проведения экспериментальных исследований и подтверждения результатов теоретических исследований был разработан и практически реализован стенд, для консолидации тонколистовых металлов методом ультразвуковой сварки, поз-

воляющий управлять основными параметрами процесса [8, 9], такими как усилие прижима тонколистовых металлов к сварочному инструменту, время ультразвукового воздействия, амплитуда ультразвуковых колебаний.

Проведенные экспериментальные исследования прочности полученных образцов тонколистовой меди позволили установить оптимальные параметры усилия прижима, времени сварки при амплитуде продольных колебаний сварочного инструмента 75 мкм.

Для создания промышленного оборудования для консолидации тонколистовых металлов в ходе исследований установлена необходимость обеспечения высокой точности изготовления рабочей поверхности сварочного инструмента, обеспечения дополнительных концентраторов напряжения и деформаций в виде специальной накатки и выступов на поверхности сварочного инструмента. Создаваемое промышленное оборудование должно исключить возникновение перекоса рабочей поверхности и свариваемых листов металла при обеспечении усилия прижима в процессе сварки. Кроме того, должны быть максимально исключены потери ультразвуковой и тепловой энергии из зоны сварки в опору, сварочный инструмент и воздушную среду вблизи и на удаленных точках от сварного шва.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Khmelev V.N.** Model of process and calculation of energy for a heat generation of a welded joint at ultrasonic welding polymeric thermoplastic materials / V.N. Khmelev, A.N. Slivin, A.D. Abramov // 8th Annual International Workshop and Tutorials on Electron Devices and Materials, EDM'07 – Proceedings 2007 8th Annual International Workshop and Tutorials on Electron Devices and Materials, EDM'07. Russian Foundation of Basic Researches (RFBR). 2007. P. 316-322.

2. Theoretical Investigations of Continuous Ultrasonic Seam Welding of Thermoplastic

Polymers and Fabrics / V.N. Khmelev, A.V. Lehr, A.N. Slivin, A.D. Abramov // Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2010: Conference Proceedings: International Conference and Seminar on Micro. Novosibirsk: NSTU, 2010. P. 341-344.

3. Физические величины / А.П. Баби́чев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братовский, и др. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

4. Investigation of Ultrasonic Surface Treatment of Metals / A.N. Slivin, V.A. Nesterov, S.S. Khmelev, S.S. Khamriteliy // Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2010: Conference Proceedings: International Conference

and Seminar on Micro. Novosibirsk: NSTU, 2010. P. 363-369.

5. **Холопов Ю.В.** Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов / Ю.В. Холопов. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд., 1988. 224 с.

6. Способ измерения амплитуды колебаний: пат. № 2292530 РФ / Г.В. Леонов, В.Н. Хмелев, Д.С. Абраменко, И.И. Савин. Заявл. 14.04.2005.

7. Ультразвуковая сварка термопластичных материалов / В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, А.Д. Абрамов, С.С. Хмелёв. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2014. 281 с.

8. **Хмелёв В.Н.** Повышение эффективности энергетического воздействия при ультразвуковой сварке / В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, А.Д. Абрамов // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 3. С. 278-281.

9. **Хмелёв В.Н.** Совершенствование ультразвуковой сварки и создание аппаратов для её реализации / В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, А.Д. Абрамов // Известия Томского политехнического университета. 2013. № 4. С. 152-157.

Хмелёв Владимир Николаевич – доктор технических наук, заместитель директора по научно-исследовательской работе Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

Сливин Алексей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Методы и средства измерения и автоматизации» Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

Абрамов Алексей Дмитриевич – инженер Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

Vladimir N. Khmelev – Dr. Sc., Professor, Deputy Director for Research, Biysk Technological Institute of Polzunov Altai State Technical University

Alexey N. Slivin – Ph.D., Associate Professor, Department of Methods, Measurement Tools and Automation, Biysk Technological Institute of Polzunov Altai State Technical University

Alexey D. Abramov – Engineer, Biysk Technological Institute of Polzunov Altai State Technical University

Статья поступила в редакцию 03.06.18, принята к опубликованию 20.06.18

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

В журнале можно опубликовать материалы научно-технических конференций, круглых столов, выставок по тематическим направлениям журнала.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТА МЕТОДИЧЕСКОЙ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ НАГРЕВА ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ПОТОКЕ

Ю.С. Архангельский, В.О. Юдина

DESIGN FEATURES AND CALCULATIONS TO CONTINUOUS MICROWAVE ELECTROTHERMAL INSTALLATIONS FOR HEATING THE FLOW OF A VISCOUS LIQUID

Yu.S. Archangelsky, V.O. Yudina

Рассмотрены особенности конструкции и расчета методической СВЧ электротермической установки для нагрева вязкой жидкости в потоке, связанные с изменением при нагреве жидкости ее вязкости, что приводит к увеличению скорости потока вдоль транспортного канала рабочей камеры установки.

Ключевые слова: СВЧ электротермическая установка, вязкая жидкость, вязкость, скорость, рабочая камера, транспортный канал

Методическая СВЧ электротермическая установка (методическая СВЧ ЭТУ) обычно применяется для пастеризации и стерилизации жидкости, например молока, в потоке [1, 2]. Рабочая камера такой методической СВЧ ЭТУ строится на базе круглого волновода, на оси которого размещен цилиндрический транспортный канал, по которому прокачивается обрабатываемая жидкость (рис. 1).

Для равномерного погонного тепловыделения вдоль транспортного канала камеры с бегущей волной (КБВ) расчету подлежат габариты поперечного сечения потока, его длина (длина транспортного канала), профиль неоднородного волновода, на базе которого собрана КБВ. Эти расчеты проводятся для частоты СВЧ генератора и средних в диапазоне температур нагрева значений диэлектрических параметров жидкости ε' и $\tan \delta$. Определенная неравномерность

The article considers the design characteristics and calculations conducted for the continuous microwave electrothermal installation applied for heating the flow of a viscous liquid. The given characteristics are connected with the changes in viscosity of the liquid under heating, which results in speeding up the flow along the transport channel of the working chamber.

Keywords: microwave electrothermal installation, viscous liquid, viscosity, speed, working chamber, transport channel

тепловыделения по поперечному сечению потока легко устраняется при турбулентном течении.

СВЧ энергия может быть использована и для термообработки вязкой жидкости с целью уменьшения ее вязкости. Конструкция и расчет рабочей камеры такой методической СВЧ ЭТУ имеет свои особенности. Эти особенности обусловлены ламинарным течением жидкости и изменением вязкости вдоль транспортного канала. При течении вязкой жидкости по транспортному каналу рабочей камеры за счет поглощения СВЧ энергии электромагнитной волны, проникающей в поток, увеличивается температура жидкости, отчего уменьшается ее вязкость и возрастает скорость потока, но остается постоянным расход жидкости

$$G = v_{\text{жс}}(z)S(z), \quad (1)$$

где $v_{ж}(z)$ – средняя скорость потока при ламинарном течении жидкости по транспортному каналу в точке с координатой z ; $S(z)$ – площадь поперечного сечения канала в точке с координатой z .

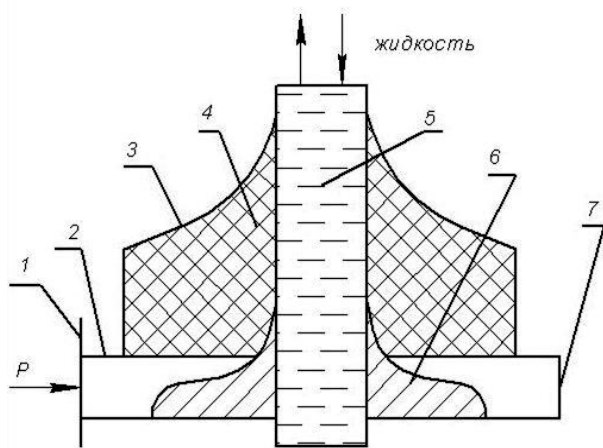


Рис. 1. Камера с бегущей волной на круглом волноводе: 1 – фланец прямоугольного волновода; 2 – прямоугольный волновод; 3 – круглый волновод; 4 – твердый радиопрозрачный диэлектрик; 5 – цилиндрический транспортный канал; 6 – согласующий элемент

Согласно соотношению (1) с увеличением скорости потока из-за уменьшения вязкости жидкости в процессе нагрева будет уменьшаться площадь поперечного сечения потока. Другими словами, жидкость не будет заполнять все поперечное сечение транспортного канала. Если транспортный канал расположен горизонтально, то между поверхностью потока и внутренней поверхностью транспортной трубы появится свободное от жидкости пространство, площадь которого будет возрастать по мере приближения к выходному шлюзу рабочей камеры. Если транспортный канал расположен вертикально, то поток жидкости будет двигаться по центральной части транспортного канала, а свободное от жидкости пространство образуется между поверхностью потока и трубой транспортного канала. Особенности расчета параметров вязкой жидкости в подобных транспортных каналах рассмотрены в работе [3].

Сохранение круглого поперечного сечения потока можно обеспечить в КБВ уменьшением внутреннего диаметра трубы

транспортного канала, но при этом активная и реактивная составляющие погонного сопротивления цилиндрического поглощающего СВЧ энергию потока жидкости изменятся [1, 4], отчего неоднородный профиль круглого волновода уже не будет оптимальным, увеличится коэффициент отражения от рабочей камеры Γ , то есть уменьшится КПД по использованию СВЧ энергии (энергетическая эффективность) $\eta = 1 - |\Gamma|^2$, не будет равномерного тепловыделения в вязкой жидкости вдоль транспортного канала. Но эти изменения недопустимы, а потому КБВ, показанную на рис. 1, применять для нагрева вязкой жидкости не рекомендуется.

Уменьшение вязкости жидкости в потоке можно обеспечить в методической СВЧ ЭТУ на камере лучевого типа (КЛТ), собранной меандром (рис. 2 а).

В такой камере транспортный канал представляет собой трубу прямоугольного поперечного сечения из радиопрозрачного материала. С увеличением скорости потока и уменьшением площади его поперечного сечения следует в расчете КЛТ предусмотреть уменьшение высоты транспортного канала (трубы):

$$b_i(z) = \frac{v_{жс} b}{v_{жсi}(z)}, \quad (2)$$

где $b_i(z)$ – высота транспортного канала в точке с координатой z ; $v_{жсi}(z)$ – средняя скорость течения жидкости по транспортному каналу в точке с координатой z ; b – высота транспортного канала на входе в КЛТ; $v_{жс}$ – средняя скорость течения жидкости на входе в КЛТ.

Соотношение (2) позволяет рассчитать закон непрерывного изменения высоты прямоугольной трубы транспортного канала вдоль излучателей СВЧ энергии КЛТ, собранной меандром. Но в таком случае электромагнитная волна из прямоугольного рупорного излучателя будет падать на плоскую, но наклонную к апертуре излучателя поверхность транспортной трубы, по которой протекает обрабатываемая жидкость, что приведет к определенному рас-

сеиванию СВЧ энергии, то есть к уменьшению энергетической эффективности КЛТ. Эти потери можно уменьшить если уменьшать высоту транспортной трубы поровну сверху и снизу (рис. 2 а).

Рассеяние СВЧ энергии можно избежать вовсе, если использовать ступенчатое изменение высоты трубы вдоль транспортного канала, то есть аппроксимировать плавно изменяющуюся зависимость $b(z)$ ломаной линией (рис. 2 б). Длина каждой ступени должна быть равна стороне апертуры излучателя, направленной вдоль транспортного канала. Что касается ширины трубы, то она должна быть равной стороне апертуры, направленной перпендикулярно потоку жидкости по транспортному каналу.

Что касается особенностей расчета КЛТ для нагрева вязкой жидкости, то при его

проведении следует учитывать, что в каждой следующей секции меандровой системы слой вязкой жидкости тоньше, чем в предыдущей секции, у него другие ε' и $\operatorname{tg} \delta$, если эти диэлектрические параметры зависят от температуры и вязкости жидкости.

Пренебрегая отражениями от границ обрабатываемой жидкости и тепловыми потерями (например на конвекцию и тепловое излучение) для i -й секции можно записать уравнение теплового баланса:

$$P_i(1 - e^{-2\alpha_i b_i}) = c_i \rho_i G(T_i - T_{i-1}), \quad (3)$$

где P_i – мощность i -го излучателя; α_i – коэффициент затухания в i -й секции; c_i , ρ_i – удельная теплоемкость и плотность жидкости в i -й секции; T_{i-1} , T_i – температуры жидкости на входе и выходе i -й секции транспортного канала.

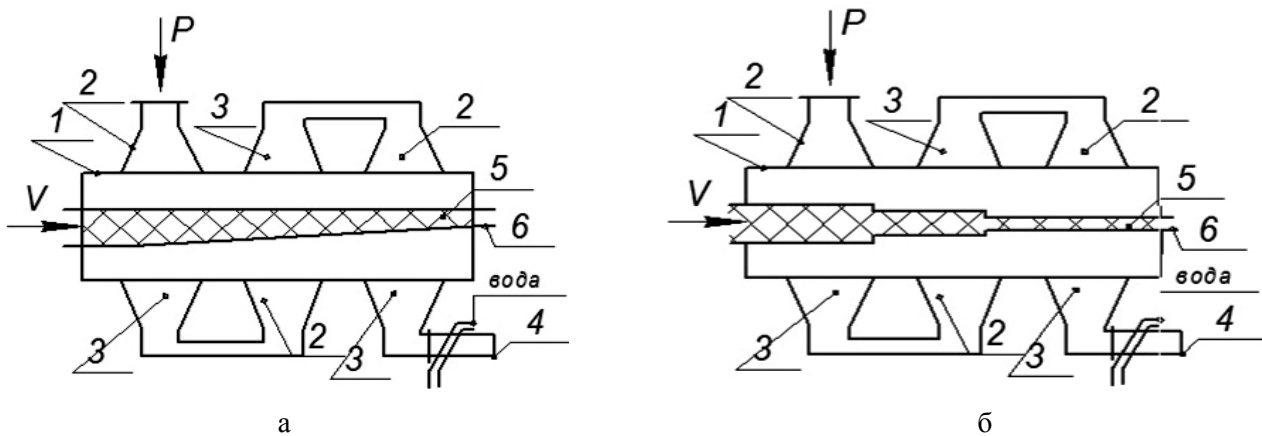


Рис. 2. Камера лучевого типа, собранная меандром: а – с непрерывно изменяющимся сечением транспортного канала; б – со ступенчатым изменением сечения транспортного канала (1 – КЛТ; 2 – излучающий рупор; 3 – приемный рупор; 4 – балластная нагрузка; 5 – жидкость; 6 – транспортный канал)

Величина T_i дает возможность определить вязкость, удельную теплоёмкость, плотность, диэлектрические параметры, на выходе i -й секции, которые применяются при расчете высоты канала b_{i+1} $i+1$ -й секции. Скорость течения $v_{ж(i+1)}$ рассчитывается по соотношениям работы [3].

Подобные расчеты должны быть проведены от секции к секции меандровой системы до тех пор, пока на выходе очередной (последней) секции останется СВЧ мощность, допустимая для рассеивания ее в балластной нагрузке (эта величина определяется заданной энергетической

эффективностью методической СВЧ ЭТУ).

Таким образом, для термообработки вязкой жидкости следует использовать методическую СВЧ ЭТУ на базе меандровой КЛТ. Жидкость должна транспортироваться по диэлектрической радиопрозрачной трубе прямоугольного поперечного сечения с уменьшающейся высотой транспортного канала от секции к секции меандровой системы. При расчете поглощения СВЧ энергии в каждой секции меандровой системы следует учитывать уменьшение высоты транспортного канала.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1998. 480 с.

2. Влияние электромагнитных полей сверхвысокочастотного диапазона на бактериальную клетку / В.В. Игнатов и др. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1978. 80 с.

3. **Высоцкий Л.И.** О некоторых неизо-термических ламинарных течениях жидкостей / Л.И. Высоцкий // Вопросы электро-технологии. 2017. № 3 (16). С. 11-15.

4. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии / Ю.С. Архангельский. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.

Архангельский Юрий Сергеевич – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Юдина Виолетта Олеговна – аспирант кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Yury S. Arkhangelsky – Honoured Worker of Science of the Russian Federation, Dr.Sc., Professor, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Violetta O. Yudina – Postgraduate, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20.05.18, принята к опубликованию 20.06.18



ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.318.3

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ ИМПУЛЬСНОГО ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДВИГАТЕЛЯ В ЕГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ

В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, Д.Н. Шестаков

EFFICIENCY OF MAGNETIC ENERGY TRANSFORMATIONS IN THE PULSE LINEAR ELECTROMAGNETIC MOTOR IN ITS ENERGY MODES

M.I. Moshkin, G.G. Ugarov, D.N. Shestakov

Актуальность исследования вызвана необходимостью определения величины магнитного КПД для известных энергетических режимов и поиска среди них наилучшего. Для каждого из рассматриваемых режимов известным графическим методом найдены за цикл механическая работа и остаточная магнитная энергия, по которым определялся магнитный КПД. Установлено, что магнитный КПД такого двигателя зависит как от конструктивных и режимных параметров, так и от коэффициента восстановления магнитной энергии при движении якоря. Поэтому двухзачерновые конструкции магнитной системы электромагнитного двигателя позволяют повысить эффективность магнитомеханического преобразования таких двигателей на 50% и более по сравнению с однозачерновыми.

Ключевые слова: линейный электромагнитный двигатель, магнитный КПД, энергетический режим

Анализ патентной и научно-технической литературы показал, что электромагнитный привод с линейным электромагнитным двигателем (ЛЭМД) отличается простотой конструкции, надёжностью, обеспечивает необходимые диапазоны изменения тягового усилия, энергии рабочего

The urgency of the study is caused by the need to determine the magnitude of magnetic efficiency for the established energy modes and find the best among the these modes. For each of the modes under consideration, a mechanical method and residual magnetic energy were found by a common graphical method for determining the magnetic efficiency. It is established that the magnetic efficiency of the given engine depends both on the design and mode parameters, and on the coefficient of restoration of magnetic energy during the movement of the armature. Therefore, the two-gap designs of the magnetic system of the electromagnetic motor make it possible to increase the efficiency of the magnetomechanical transformation of such engines by 50 percent or more in comparison with single-gap engines.

Keywords: linear electromagnetic motor, magnetic efficiency, energy regime

хода и частоты ходов для ряда технологических операций [1-3]. Основное применение таких двигателей – приводы электромагнитных машин циклического и ударного действия.

Импульсный характер энергопреобразования линейных электромагнитных двига-

телей (ЛЭМД) за рабочий ход его подвижного элемента – якоря является особенностью таких двигателей. Другой их особенностью является ограниченное перемещение якоря за рабочий ход. Установлено, что неэффективное энергопреобразование магнитной энергии рабочих зазоров в механическую энергию (работу) обуславливает низкие значения удельной энергии рабочего хода (энергии удара) на единицу объема активных материалов двигателя [1-3]. Известно, что эффективность преобразования магнитной энергии рабочих зазоров ЛЭМД в механическую работу количественно определяется с помощью коэффициента преобразования – магнитного КПД η_m , определяемого через механическую работу A и остаточную магнитную энергию $W_{м.о}$ к концу рабочего хода двигателя для энергетических режимов ЛЭМД 2...7 [4, 5]:

$$\eta_m = \frac{A}{A + W_{м.о}}. \quad (1)$$

Для режима 1 магнитный КПД определится иначе и учитывает магнитную энер-

гию W_{MR} , которая рекуперируется в источник при движении якоря и уменьшает механическую работу A :

$$\eta_m = \frac{A - W_{MR}}{A + W_{м.о} - W_{MR}}.$$

В статье ставится задача расчетным путем определить эффективность преобразования магнитной энергии рабочих зазоров в механическую работу для энергетических режимов импульсного ЛЭМД и оценить влияние на нее режимных и конструктивных параметров, задаваемых при проектировании, без учета насыщения магнитной системы.

Исследование условий энергопреобразования и режимов работы импульсных ЛЭМД позволило выявить семь энергетических режимов 1...7 [5] с различными соотношениями между магнитной энергией W_{MD} , поступившей от источника при движении якоря, и механической работой A (рис. 1).

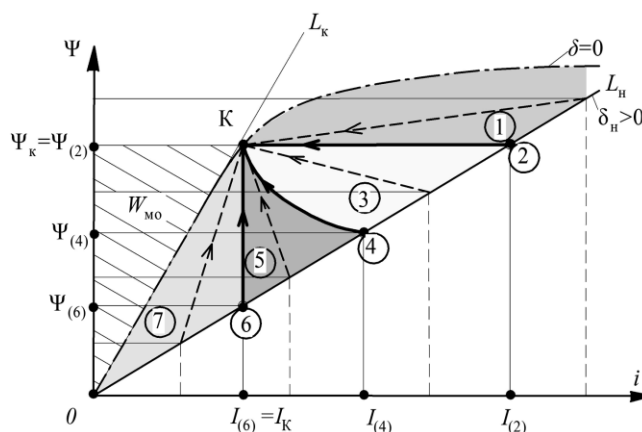


Рис. 1. Энергетические режимы 1...7 импульсного ЛЭМД при $W_{мо} = \text{const}$

Критерием разграничения указанных энергетических режимов служит коэффициент восстановления магнитной энергии k_R при движении якоря ЛЭМД от состояния, соответствующего начальному рабочему зазору $\delta = \delta_n$, к состоянию, при котором конечный рабочий зазор $\delta = 0$.

Характеристики режимов 2...7, такие как механическая работа A и остаточная магнитная энергия W_{MO} , определены из-

вестным графическим методом, а магнитная эффективность η_m определена в таблице по (1) через начальные и конечные значения токов I_1, I_2 , статические индуктивности L_1, L_2 , потокоцепления Ψ_1, Ψ_2 и их кратности k и m [6] для ненасыщенного магнитопровода ЛЭМД:

$$m = \frac{L_2}{L_1}; k_{(рез)} = \frac{I_1}{I_2}; k_B = \frac{\Delta W_{MD}}{\Delta A}.$$

Характеристики энергетических режимов импульсных ЛЭМД
при ненасыщенной магнитной цепи

Энергетич. режим	Особенности режима	Механическая работа, А	Остаточная магнитная энергия, W_{MO}	Магнитный КПД, η_m
2	$I_n > I_k, \Psi_n = \Psi_k = \Psi;$ $m = k > 1; k_g = -1$	$0,5 \cdot I^2 \cdot L_n \cdot (m-1)$	$\frac{0,5 \cdot I^2 \cdot L_n \cdot m}{k^2}$	$\frac{(m-1)}{m}$
3	$I_n > I_k, \Psi_n < \Psi_k;$ $m > k > \sqrt{m} > 1;$ $-1 < k_g < 0$	$\frac{0,5 \cdot I^2 \cdot L_n \cdot (m-1)}{k}$	$\frac{0,5 \cdot I^2 \cdot L_n \cdot m}{k^2}$	$\frac{(m-1)}{m-1+m/k_{(3)}}$
4	$I_n > I_k, \Psi_n < \Psi_k;$ $k = \sqrt{m} > 1; k_g = 0$	$\frac{0,5 \cdot I^2 \cdot L_n \cdot (m-1)}{k}$	$\frac{0,5 \cdot I^2 \cdot L_n \cdot m}{k^2}$	$\frac{(m-1)}{m-1+\sqrt{m}}$
5	$I_n > I_k, \Psi_n < \Psi_k;$ $\sqrt{m} > k > 1; 0 < k_g < 1$	$\frac{0,5 \cdot I^2 \cdot L_n \cdot (m-1)}{k}$	$\frac{0,5 \cdot I^2 \cdot L_n \cdot m}{k^2}$	$\frac{(m-1)}{m-1+m/k_{(5)}}$
6	$I_n = I_k = I, \Psi_n < \Psi_k;$ $m > k = 1; k_g = +1$	$0,5 \cdot I^2 \cdot L_n \cdot (m-1)$	$0,5 \cdot I^2 \cdot L_n \cdot m$	$\frac{(m-1)}{2m-1}$
7	$I_n < I_k, \Psi_n < \Psi_k;$ $m > 1 > k > 0; k_g > 1$	$\frac{0,5 \cdot I^2 \cdot L_n \cdot (m-1)}{k}$	$\frac{0,5 \cdot I^2 \cdot L_n \cdot m}{k^2}$	$\frac{(m-1)}{m-1+m/k_{(7)}}$

При этом изменение механической работы ЛА считается положительным и происходит за счет электромагнитного тягового усилия при уменьшающемся рабочем зазоре [5].

При конечном рабочем зазоре $\delta = 0$ магнитопровод двигателя насыщен и его магнитная характеристика аппроксимирована полиномом девятой степени

$$H = \alpha \cdot B_* + \beta \cdot B_*^5 + \xi \cdot B_*^9,$$

где H и $B_* = B/B_b$ – напряженность и относительная магнитная индукция магнитопровода; α, β, ξ – коэффициенты аппроксимации [1]; базисная индукция $B_b = 1$ Тл. Эта характеристика служит естественным ограничением для реальных процессов.

Оценим влияние коэффициента восстановления k_R на эффективность преобразования магнитной энергии η_m для режимов 2...7 импульсного ЛЭМД без учета насыщения магнитопровода. Оценку выполним

при неизменной остаточной магнитной энергии $W_{MO} = \text{const}$ для нулевого рабочего зазора ($\delta = 0$) и одном и том же конечном потокосцеплении ($\Psi_2 = \text{const}$). На рис. 1 энергия W_{MO} показана штриховкой. При таком сравнении конечный ток I_k для всех режимов будет одним и тем же, а начальный ток $I_{n(\text{реж})}$ будет соответствовать конкретному энергетическому режиму ($I_{n(2)} \dots I_{n(7)}$) с коэффициентом восстановления k_g . На рис. 1 энергетические режимы показаны в виде областей и их границ и обозначены в кружочках.

Для режимов 2...7, показанных на энергетической плоскости $\Psi-i$ (рис. 1) в виде областей и их границ, известным графическим методом получены расчетные выражения для механической работы A , остаточной магнитной энергии W_{MO} и магнитного КПД η_m , которые представлены в табл. 1.

Например, для режима 2 получим:

$$\eta_{m(2)} = \frac{0,5 \cdot I_{n(2)}^2 \cdot (m-1) / k_{(2)}}{0,5 \cdot I_{n(2)}^2 \cdot (m-1) / k_{(2)} + 0,5 \cdot I_{n(2)}^2 \cdot L_n \cdot m / k_{(2)}^2} = \frac{m-1}{m}. \quad (2)$$

Очевидно, что существует обобщенная формула магнитного КПД, справедливая для рассматриваемых режимов:

$$\eta_{m(реж)} = \frac{(m-1)}{m-1+m/k_{(реж)}}.$$

Характеристики $\eta_m = f(k_g; m)$ на рис. 2 соответствуют различным значениям

кратности изменения индуктивности m , которая является конструктивным параметром импульсного ЛЭМД. Эти значения характерны для однозачорных ($m = 3$), двухзачорных ($m = 5$) и трехзачорных ($m = 7$) конструкций магнитных систем двигателей.

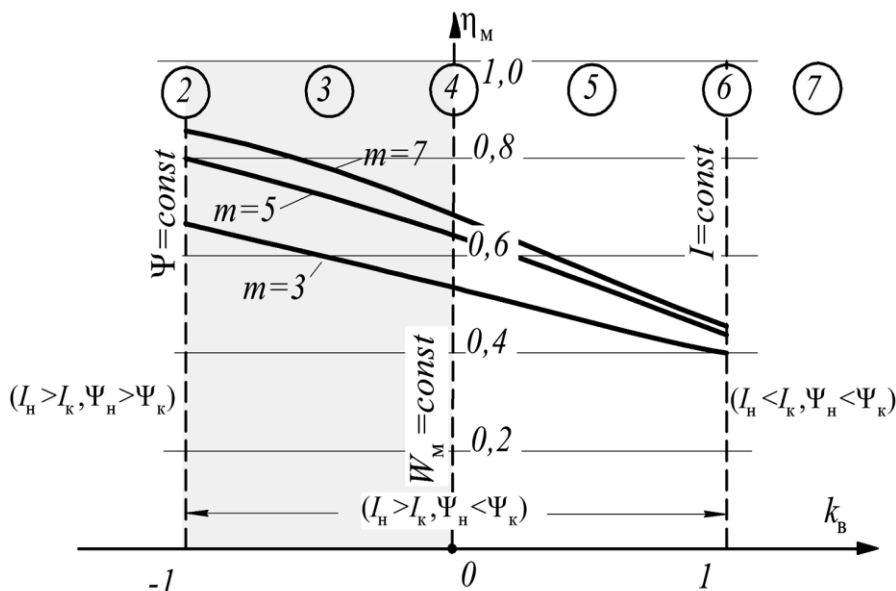


Рис. 2. Зависимость магнитного КПД η_m от коэффициента восстановления k_g и кратности изменения индуктивности m

Из графиков следует, что лучшими энергетическими режимами будут те, при которых коэффициент восстановления находится в диапазоне $-1 \leq k_g \leq 0$. Ими будут режимы при неизменном потоке сцепления (режим 2, $\Psi = \text{const}$), либо при незначительном росте последнего при движении якоря и снижении тока обмотки двигателя. Указанные режимы соответствуют энергопреобразованию, происходящему преимущественно за счет предварительно накопленной магнитной энергии и при минимуме потребляемой в процессе движения якоря электрической энергии от источника. Идея предварительного накопления магнитной энергии на предыдущем этапе энергопреобразования была впервые высказана в ра-

боте [1] и далее развита в последующих работах [3, 4, 7]. Величина магнитного КПД растет с увеличением числа магнитных зазоров.

По сравнению, например, с режимом $I = \text{const}$ (рис. 2) функционирование импульсного ЛЭМД по лучшему из режимов (режим 2, $\Psi = \text{const}$) позволяет повысить магнитный КПД на 87% применительно к трехзачорной МС, на 82% — для двухзачорной и на 67% — для однозачорной МС

Полученные результаты целесообразно учитывать при создании энергоэффективных электромагнитных приводов как при проектировании импульсных ЛЭМД, так и при выборе их режима, реализуемого устройством питания и управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ряшенцев Н.П.** Электромагнитные прессы. / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров,

А.В. Львицын. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. 216 с.

2. **Певчев В.П.** Проектирование мощных короткоходовых импульсных электромагнитных двигателей: монография / В.П. Певчев, В.В. Ивашин. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012. 142 с.

3. **Мошкин В.И.** Импульсные линейные электромагнитные двигатели / В.И. Мошкин, В.Ю. Нейман, Г.Г. Угаров. Курган: Изд-во КГУ, 2010. 220 с.

4. **Мошкин В.И.** Влияние режимных и конструктивных параметров линейных электромагнитных двигателей на эффективность электромеханического преобразования энергии / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2012. № 2 (66). Вып. 2. С. 124-129.

5. **Мошкин В.И.** Энергетические режимы импульсных линейных электромагнит-

ных двигателей / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016 (ICPDS'2016) (Пермь, 3-7 октября 2016 г.). Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2016. С. 71-76.

6. **Мошкин В.И.** Критерии эффективности преобразования магнитной энергии в линейном электромагнитном двигателе / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, О.В. Вдовина // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2018. № 3 (47). Вып. 2. С. 71-76.

7. **Мошкин В.И.** Концентрация магнитной энергии в рабочих зазорах импульсного линейного электромагнитного двигателя на этапе ее электромагнитного преобразования / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Вопросы электротехнологии. 2015. № 4 (9). С. 20-26.

Мошкин Владимир Иванович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Энергетика и технология металлов» Курганского государственного университета

Угаров Геннадий Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Камышинского технологического института Волгоградского государственного технического университета

Шестаков Дмитрий Николаевич – доцент кафедры «Энергетика и технология металлов» Курганского государственного университета

Vladimir I. Moshkin – PhD, Head: Department of Power Engineering and Metal Technology, Kurgan State University

Gennady G. Ugarov – Dr.Sc., Professor, Department of Power Supply to Industrial Enterprises, Kamyshin Technological Institute of Volgograd State Technical University

Dmitry N. Shestakov – Associate Professor, Department of Power Engineering and Metal Technology, Kurgan State University

Статья поступила в редакцию 04.06.18, принята к опубликованию 20.06.18

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

УДК 621.314

ТРЕХФАЗНЫЙ ИНВЕРТОР С АМПЛИТУДНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ ЛОКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Ю.М. Голембиовский, Ю.Б. Томашевский, А.В. Старков

A THREE-PHASE VOLTAGE INVERTER WITH AMPLITUDE AND PULSE-TYPE MODULATION FOR THE LOCAL ELECTRICITY SUPPLY SYSTEMS

Yu.M. Golembiovsky, Yu.B. Tomashevsky, A.B. Starkov

Рассмотрены топология и электромагнитные процессы в автономном трёхфазном инверторе напряжения, построенном на базе однофазных схем, обеспечивающем высокое качество генерируемого напряжения. Приведены результаты имитационного моделирования. Дана оценка степени синусоидальности напряжения и тока нагрузки при разных углах управления ключами.

Ключевые слова: инвертор напряжения, ступенчатая модуляция, коэффициент гармоник, углы управления

Одним из основных недостатков автономных инверторов напряжения (АИН) является высокий коэффициент гармоник выходного напряжения K_u , что неприемлемо для большинства потребителей. Самым распространённым в настоящее время способом улучшения качества генерируемой инвертором электроэнергии является применение широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [1], которая позволяет сместить спектр гармонических составляющих выходного сигнала в сторону высоких частот. Это даёт возможность уменьшить массогабаритные показатели фильтров, устанавливаемых на выходе АИН. В ряде случаев разработчики отказываются от установки фильтров, возлагая фильтрующие функции на индуктивную составляющую нагрузки. Но такое решение ухудшает эксплуата-

The topology and electromagnetic processes in an autonomous three-phase voltage inverter based on single-phase circuits providing high quality of the generated voltage are considered. The results of simulation modeling are presented. The degree of voltage sinusoidality and load current at various control angles is given.

Keywords: voltage inverter, step modulation, harmonic ratio, control angles.

ционные показатели потребителей и уменьшает срок эксплуатации оборудования. Кроме того, с ростом частоты коммутации возрастают динамические потери в силовых ключах. Как показано в [2], при частоте ШИМ больше 5000 Гц установленная мощность вентиляционного комплекта в ШИМ-инверторах начинает превышать таковую в АИН, использующих амплитудно-импульсную модуляцию (АИМ).

Отмеченные недостатки схем с ШИМ инициировали исследования, направленные на разработку топологии автономных инверторов с АИМ и в особенности схем со ступенчатой модуляцией (СМ) [3]. Следует, однако, отметить, что при всём многообразии описанных в литературе схем с амплитудной модуляцией они в основном касаются однофазных АИН. При этом форми-

рование ступенчатого выходного напряжения осуществляется либо путём трансформаторного суммирования сигналов отдельных подсхем инвертора, либо подключением ко входу АИН различных источников постоянного напряжения разной амплитуды в определённые интервалы времени на периоде выходной частоты. Что касается трёхфазных АИН, то реализация ступенчатого напряжения на выходе трёхфазного моста осуществляется исключительно путём надлежащего трансформаторного суммирования сигналов, генерируемых отдельными мостами [3]. При этом следует иметь в виду, что эту задачу нельзя решить с помощью только одного многообмоточного трёхфазного трансформатора из-за возникающих в этом случае значительных уравнивающих токов, вызываемых взаимным влиянием трёхфазных инверторов через общую магнитную систему трансформатора. Для устранения такого явления необходимо, чтобы формирование многоступенчатого напряжения на нагрузке осуществлялось с помощью N трёхфазных трансформаторов (N – количество трёхфазных инверторов в системе) с одной первичной и одной вторичной обмотками на фазу.

Получить трёхфазное ступенчатое напряжение с помощью коммутатора источников постоянного тока на входе трёхфазного мостового АИН принципиально невозможно из-за сдвига фазовых напряжений. В то же время желание иметь трёхфазный АИН с улучшенной формой выходного напряжения и не имеющий трансформаторов на выходе представляется вполне оправданным, учитывая увеличенные массогабаритные показатели трансформаторов (и, следовательно, АИН) в особенности при широком частотном регулировании электроприводов.

Целью исследования является синтез топологии, интервалов формирования ступеней в кривой выходного напряжения и анализ электромагнитных процессов в трёхфазном без трансформаторном АИН с улучшенным качеством напряжения на нагрузке, удовлетворяющим требованиям ГОСТ 32144-2013.

Схемотехника и электромагнитные процессы. Решить проблему синтеза трёхфазного инвертора без трансформаторного выхода и с высоким качеством генерируемого напряжения можно на базе трёх однофазных инверторов [4,5] с коммутаторами источников питания на входах АИН. Схема такого инвертора показана на рис. 1.

Однофазные инверторы могут быть соединены в звезду либо в треугольник. Это практически не сказывается на качестве выходного напряжения. На входах каждого из АИН установлены коммутаторы источников постоянного напряжения, обеспечивающие получение на выходе n -ступенчатого сигнала. Количество ступеней связано с числом источников k двоичным соотношением: $n = 2^k$. При $k = 3$ формируется восьмиступенчатое фазное напряжение, удовлетворяющее требованиям стандарта по допустимой величине коэффициента гармоник K_u . При этом напряжения источников постоянного тока $E_3:E_2:E_1$ соотносятся как 4:2:1. В этом случае выполняется требование трёхфазной системы – равенство нулю суммы мгновенных значений фазовых U_f (и линейных U_l) напряжений: $U_{f1}+U_{f2}+U_{f3} = 0$.

Углы управления и, следовательно, длительности ступеней оптимизированы [6] по критерию минимума коэффициента гармоник K_u и равны $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 130^\circ, 140^\circ, 150^\circ, 160^\circ, 170^\circ, 180^\circ$ на половине периода выходного напряжения. Временные диаграммы импульсов управления ключами одного из инверторов показаны на рис. 2. Углы управления двумя другими мостами сдвинуты соответственно на 120 и 240 градусов.

Кривые мгновенных значений фазового U_f и линейного U_l напряжений и тока I нагрузки, полученные в результате имитационного моделирования в системе PSim, приведены на рис. 3. Коэффициенты гармоник напряжения и тока составили: $K_u = 6,6\%, K_i = 0,6\%$.

Ещё более высокое качество электроэнергии получается при наличии в кривой выходного напряжения ступени

нулевого уровня. Углы управления ключами инверторов, оптимизированные с помощью генетического алгоритма, равны: 2°, 11°, 21°, 32°, 44°, 57°, 71°, 109°, 123°, 136°, 148°, 159°, 169°, 178°, 182°, 191°, 201°, 212°, 224°, 237°, 251°, 289°, 303°,

316°, 328°, 339°, 349°, 358°. Временные диаграммы импульсов управления представлены на рис. 4.

Мгновенные значения фазового и линейного напряжений и тока нагрузки показаны на рис. 5.

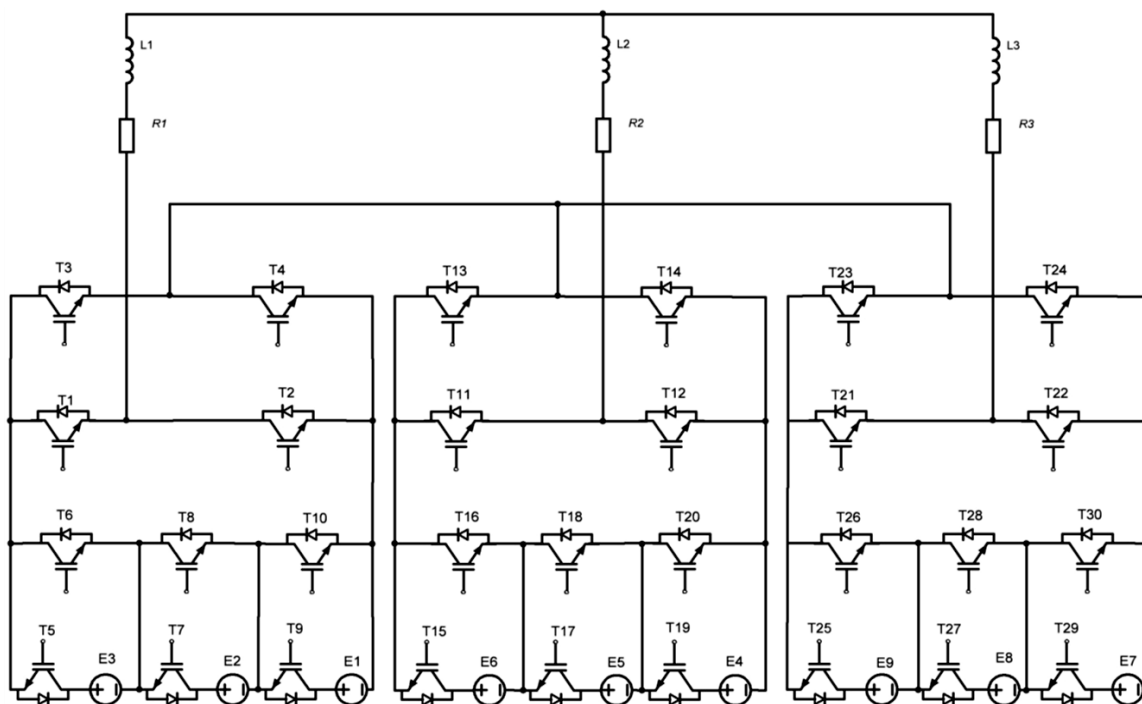


Рис. 1. Трёхфазный автономный инвертор напряжения

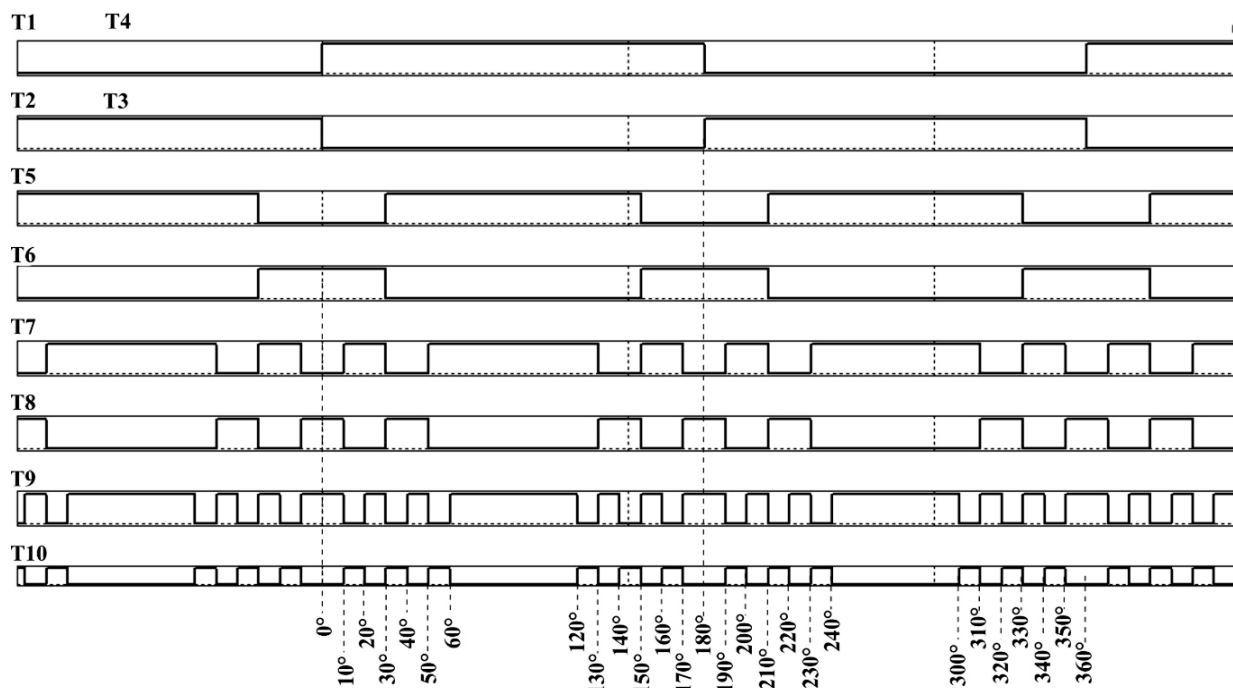


Рис. 2. Временные диаграммы импульсов управления однофазным инвертором и коммутатором, обеспечивающих кривые мгновенных значений фазовых и линейных напряжений без ступени нулевого уровня

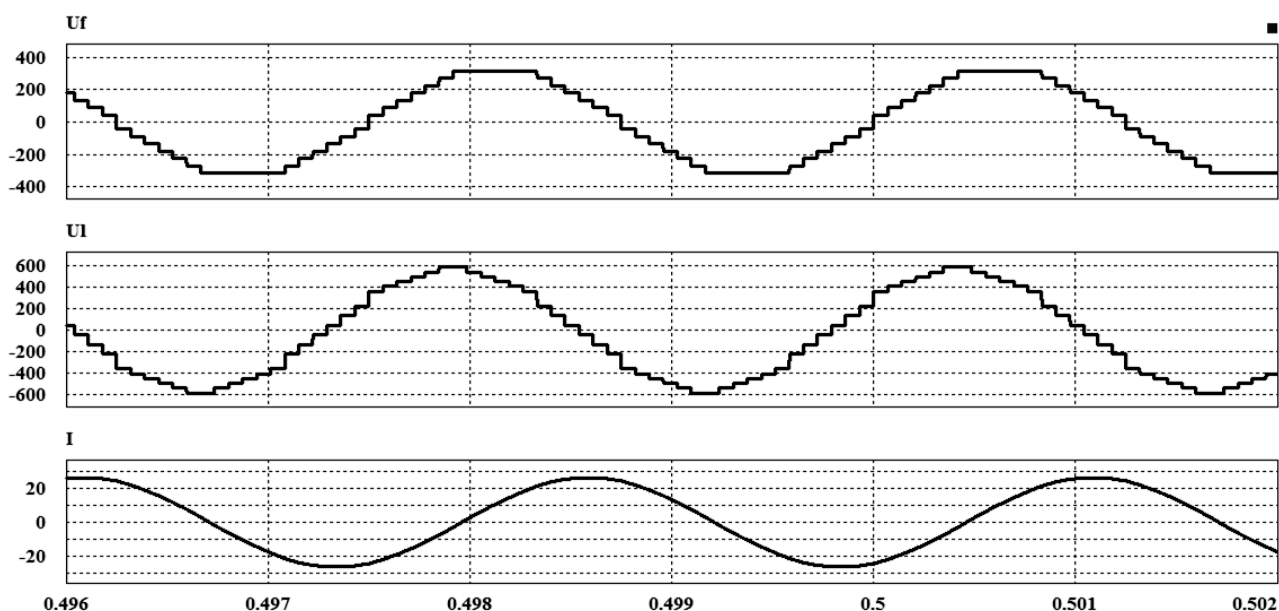


Рис. 3. Мгновенные значения фазового U_f , линейного U_1 напряжений и тока I нагрузки

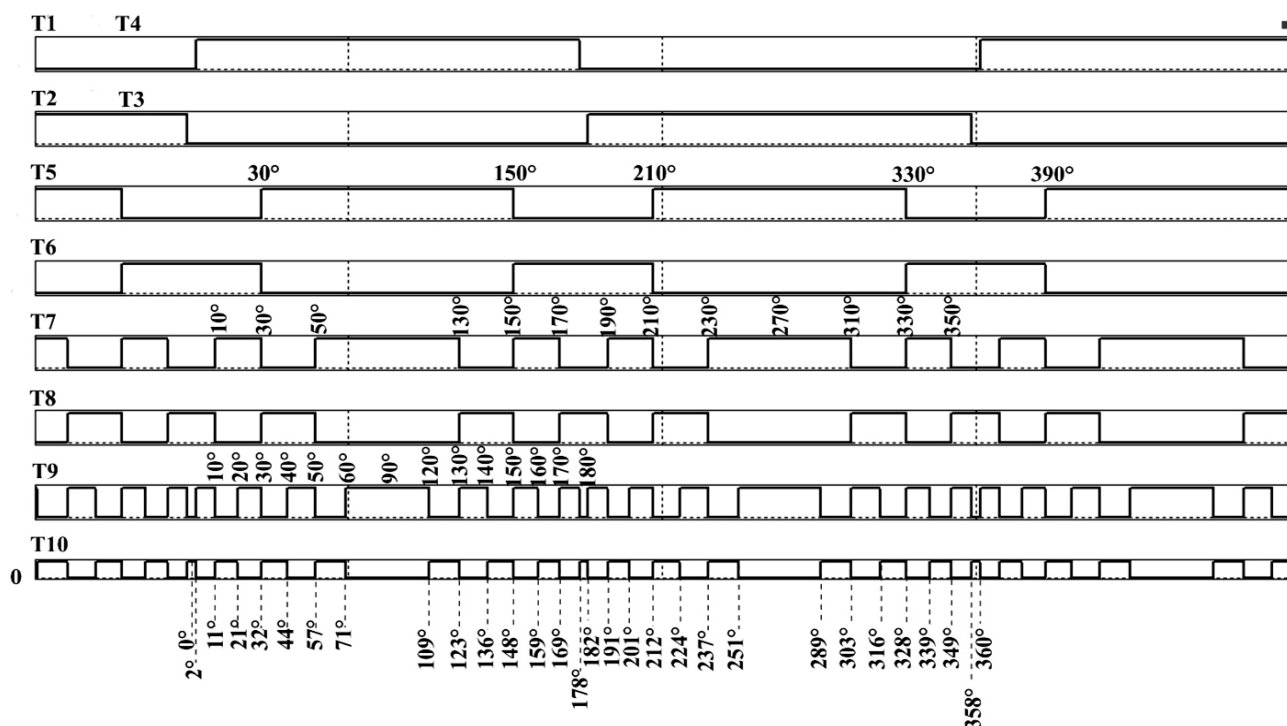


Рис. 4. Временные диаграммы импульсов управления одним из однофазных инверторных мостов, создающих в кривых выходного напряжения ступень нулевого уровня

Количество ступеней в кривой напряжения на нагрузке возросло до 11 по сравнению с рис. 3. Коэффициенты гармоник K_u и K_i соответственно равны 6 и 0,7%.

Итак, синтезированная и исследованная схема трёхфазного АИН удовлетворяет требованию действующего стандарта на качество электроэнергии во всём диапазоне изменения коэффициента мощности

нагрузки $0 \leq \cos \varphi \leq 1$. Для получения такого же качества напряжения на нагрузке путём трансформаторного суммирования сигналов по типу [7], генерируемых трёхфазными АИН, потребовалось бы пять трёхфазных мостов и пять трёхфазных трансформаторов. В этом случае суммарное количество силовых ключей стало таким же как и в рассмотренной схеме.

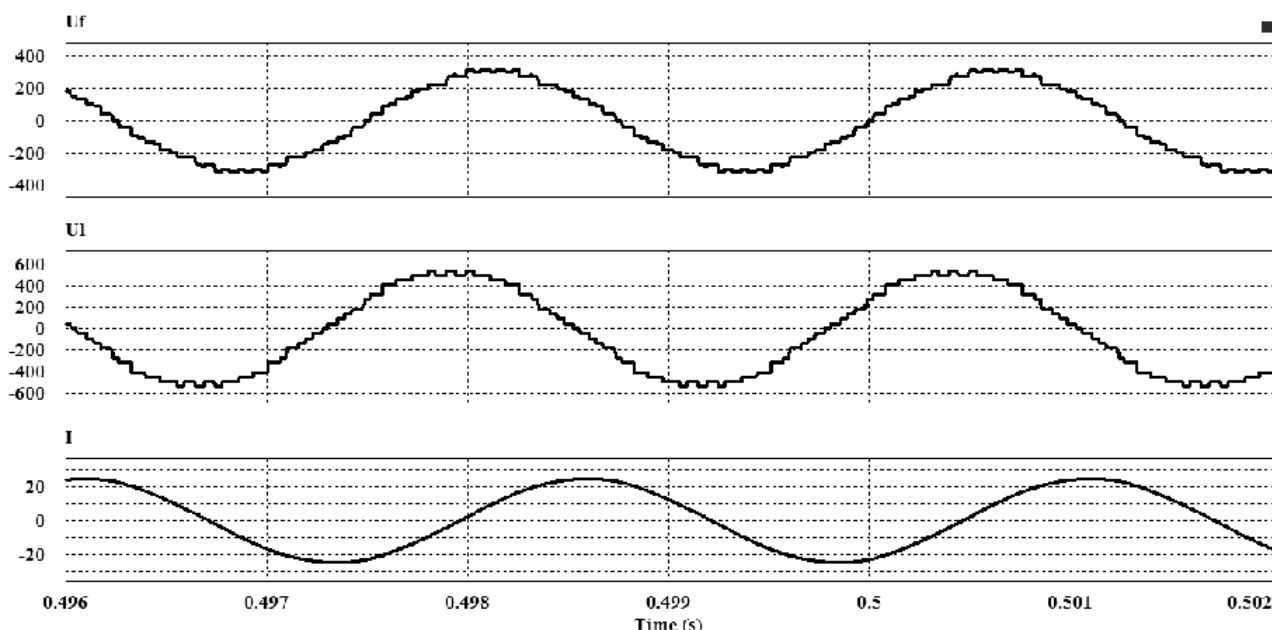


Рис. 5. U_ϕ , U_1 – фазовое и линейное напряжения, I – ток нагрузки

Недостатком схемы является необходимость иметь 9 гальванически изолированных источников постоянного тока для питания однофазных инверторных мостов. Если такие источники выполняются на основе выпрямителей, то аппаратные затраты могут быть несколько уменьшены применением одного входного трансформатора с соответствующим количеством вторичных

обмоток. В случае использования рассмотренного АИН в системах локального электроснабжения, содержащих возобновляемые источники энергии (солнечные панели, аккумуляторы), организация независимых источников постоянного тока в составе такого трёхфазного инвертора вообще не является проблемой и не увеличивает аппаратные затраты.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Зиновьев Г.С.** Силовая электроника / Г.С. Зиновьев. М.: Юрайт, 2012. 667 с.
2. **Голембиовский Ю.М.** Влияние частоты широтно-импульсной модуляции на установленную мощность автономного инвертора напряжения / Ю.М. Голембиовский, А.А. Щербаков // Известия вузов. Электромеханика. 2014. № 1. С. 48-52.
3. **Моин В.С.** Стабилизированные транзисторные преобразователи / В.С. Моин. М.: Энергоатомиздат, 1986. 376 с.
4. Патент на полезную модель 130159 Российская Федерация, МПК Н 02 М7/48 (2007.01). Однофазный инвертор со ступенчатым выходным напряжением / Ю.М. Голембиовский, А.А. Щербаков; заявл.09.01.13; опубл.10.07.13.

5. Трёхфазный инвертор с амплитудно-импульсной модуляцией для систем локального электроснабжения / Ю.М. Голембиовский, Ю.Б. Томашевский, Д.Ю. Луков, А.В. Старков // Вестник ЮУрГУ. 2018. Т. 18. № 1. С. 75-81.
6. **Колдаев Р.В.** Оптимизация гармонического состава выходного напряжения статических преобразователей частоты / Ю.М. Голембиовский, Р.В. Колдаев // Технічна електродинаміка. Киев. 2000. Ч. 8. С. 51-54.
7. Патент на полезную модель № 110880 Российская Федерация, МПК Н 02 М7/48. Трёхфазный сложномостовой инвертор напряжения / Ю.М. Голембиовский, О.В. Тимофеева. Опубл. 27.11.2011 Бюл. 33.

Голембиовский Юрий Мичиславович – доктор технических наук, профессор кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А.

Yury M. Golembiovsky – Dr.Sc., Professor, Department of Systems Engineering, Yuri Gagarin State Technical University

Томашевский Юрий Болеславович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Системотехника» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А.

Yury B. Tomashevsky – Dr.Sc., Professor, Head: Department of Systems Engineering, Yuri Gagarin State Technical University

Старков Андрей Владимирович – инженер-конструктор ООО «ЛионСистемс», г. Саратов

Andrei B. Starkov – Design Engineer, ООО LionSystems, Saratov

Статья поступила в редакцию 30.05.18, принята к опубликованию 20.06.18

УДК 621.314

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ РАЗЛИЧНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ

И.И. Артюхов, С.В. Молот, Г.Н. Тулепова

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY IN HYBRID POWER SUPPLY SYSTEMS WITH THE ENERGY SOURCES OF VARIOUS PHYSICAL NATURE

I.I. Artyukhov, S.V. Molot, G.N. Tulepova

Электроснабжение объектов, не присоединенных к централизованным электрическим сетям, традиционно осуществляется на базе дизель-генераторов. Основным недостатком таких источников энергии является большой расход топлива. Его можно компенсировать за счет использования возобновляемых источников энергии и создания гибридных систем электроснабжения. Но использование таких систем приводит к необходимости решения ряда задач электромагнитной совместимости. В статье описаны некоторые вариации построения гибридных систем электроснабжения.

The power supply of objects not connected to the centralized grids is traditionally carried out on the basis of diesel generators. The main disadvantage of these energy sources is high fuel consumption. It can be compensated using the renewable energy sources and creation of hybrid power supply systems. However, using such systems leads to the need to solve a number of problems with electromagnetic compatibility. The article describes a possibility for constructing hybrid power supply systems. A method for operational control of the load capacity of energy sources and time-sharing of the starting modes of powerful electrical re-

Предложен способ оперативного управления нагрузочной способностью источников энергии и совместного использования стартовых режимов мощных электрических приемников, позволяющий избежать ряда проблем с обеспечением электромагнитной совместимости.

Ключевые слова: гибридная система электроснабжения, электромагнитная совместимость, дизель-генератор, ветрогенератор, солнечная панель

Электроснабжение объектов, не подключенных к централизованным сетям, традиционно осуществляется на базе дизель-генераторов. Основной недостаток этих источников электроэнергии – высокий расход дизельного топлива, которое необходимо доставлять в удаленные районы. При этом доставка топлива в удаленные районы зачастую зависит от погодных условий, от времени года, поэтому не всегда возможна, что является одной из главных причин снижения надежности электроснабжения [1].

Наличие в регионе ветра и солнца делает целесообразным создание гибридных систем электроснабжения (СЭС), в которых дизель-генераторы дополняются возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) [2]. Если в регионе имеется большой потенциал ветровой энергии, то гибридные СЭС строятся на базе ветродизельных установок.

ceivers is proposed. This method allows for avoiding a number of electromagnetic compatibility problems.

Keywords: hybrid power supply system, electromagnetic compatibility, diesel generator, wind generator, solar panel

В географических зонах с высоким уровнем солнечной радиации целесообразно применять солнечно-дизельные установки [3]. В общем случае могут быть созданы гибридные СЭС, позволяющие эффективно использовать различные виды возобновляемой энергии.

Однако использование только одного вида ВИЭ в составе гибридной СЭС не выгодно экономически в районах с большими перепадами скоростей ветра или прихода солнечной радиации. Оборудование СЭС приходится рассчитывать на наихудшие условия работы источника энергии, что приводит, в свою очередь, к значительному удорожанию СЭС в целом.

В качестве примера на рис. 1 показаны графики изменения в течение двух летних суток скорости ветра и солнечной радиации для левобережного региона Саратовской области.

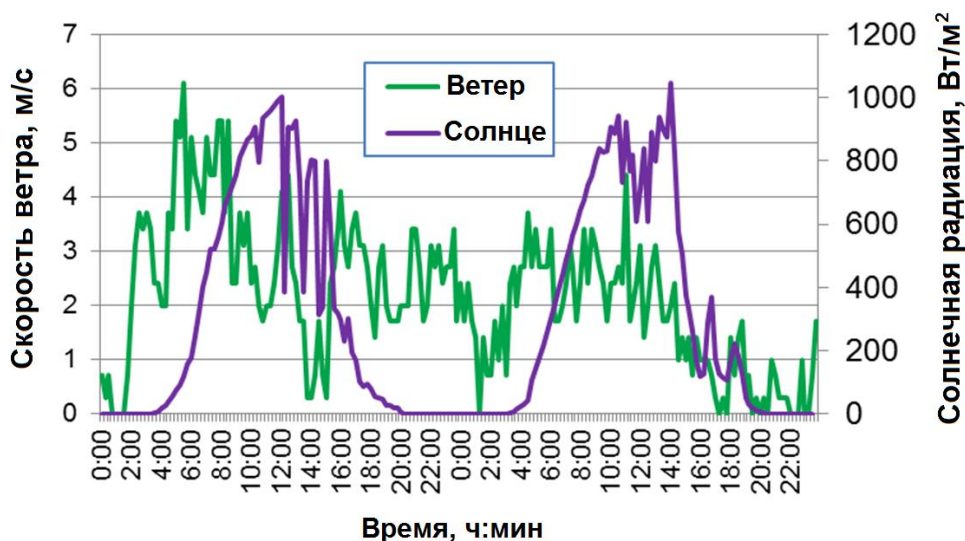


Рис. 1. Графики изменения скорости ветра и солнечной радиации

В этом случае более целесообразным является комбинированное применение ВИЭ различных видов. Это объясняется тем, что во многих случаях пик прихода солнечной радиации приходится на минимум скорости ветра и наоборот, что позволяет использовать в составе гибридной СЭС энергоустановки меньшей мощности по сравнению с одиночными системами.

Использование двух различных источников энергии (солнце и ветер) повышает надежность выработки электроэнергии системой, возникает возможность использовать аккумуляторные батареи меньшей емкости по сравнению с одиночными системами, что, в свою очередь, положительно сказывается на общих затратах на производство энергии в автономных условиях.

Вместе с тем, объединение в единую систему электротехнических комплексов, в которых осуществляется преобразование энергии различной физической природы в электрическую энергию, приводит к необходимости решения ряда задач по обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС).

ЭМС является современным понятием, объединяющим такие известные электромагнитные явления, как радиопомехи, влияние на сеть, перенапряжения, колебания напряжения сети, электромагнитные влияния, паразитные связи, фон промышленной частоты 50 Гц, воздействия заземления и т.д. Существует несколько определений понятия «электромагнитная совместимость». Так, стандарт VDE 0870 (Общество немецких электротехников) определяет ЭМС как «способность электрического устройства удовлетворительно функционировать в его электромагнитном окружении, не влияя на это окружение, к которому принадлежат также и другие устройства, недопустимым образом». ГОСТ РФ 50397-92 определяет ЭМС как «способность технического средства функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и

не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам». При этом под техническим средством понимается изделие, оборудование, аппаратура или их составные части, функционирование которых основано на законах электротехники, радиотехники и (или) электроники, содержащие электронные компоненты или схемы, выполняющие одну или несколько функций: усиление, генерирование, преобразование, переключение и запоминание.

Проблема ЭМС применительно к гибридным СЭС обусловлена рядом факторов: нестабильный характер процесса выработки электроэнергии солнечными панелями и ветрогенератором, нелинейность вольт-амперных характеристик источников энергии, взаимное влияние оборудования и нагрузки на режим работы оборудования, работа преобразовательных устройств в ключевом режиме. При этом наряду с кондуктивными помехами, которые распространяются в проводящей среде, в частности, по проводам, кабелям, оболочкам, шиннопроводам, проводящим конструкциям, системам заземления, возникают помехи излучения, которые являются результатом воздействия электростатического, электрического и магнитного полей или их комбинаций и распространяются через окружающее пространство.

Ввиду исключительно широкого спектра вопросов, обусловленных возникновением и действием помех, в данной работе ограничимся рассмотрением тех явлений, которые являются причиной отклонения показателей качества электроэнергии от заданных значений.

На рис. 2 представлен распространенный вариант построения гибридной СЭС, использующей ВИЭ. Суммирование потоков энергии осуществляется на шине переменного тока. Основным источником энергии является дизель-генератор, параллельно которому подключен ветрогенератор. Кроме того, в нагрузку через инвертор с синусоидальным фильтром поступает энергия от солнечных панелей.

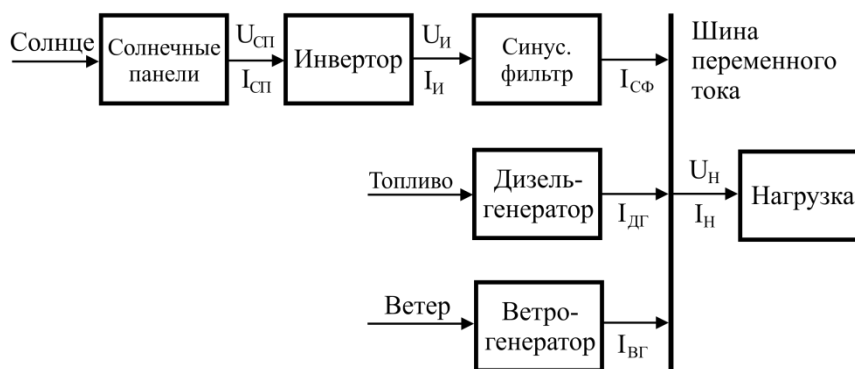


Рис. 2. Гибридная СЭС с общей шиной переменного тока

Показанная на рис. 2 схема гибридной СЭС позволяет легко масштабировать систему, устанавливая, например, несколько ветрогенераторов. Отсутствие дополнительных преобразований электроэнергии определяет высокий КПД энергетической системы в целом. Однако обеспечение ЭМС генерирующего и электропотребляющего оборудования в данной системе не является тривиальной задачей. На выходах электрических генераторов должны быть заданные, одинаковые и стабильные значения напряжений и частот, что подразумевает применение ветрогенераторов со сложными системами аэродинамической стабилизации частоты вращения ветроколеса и мультипликатором, или использование асинхронной машины с фазным ротором, при соответствующем ее управлении от сетевого инвертора. Подобный тип

ветрогенераторов характерен для «большой ветроэнергетики» и находит крайне ограниченное применение при построении малых энергетических систем ввиду большой стоимости энергоустановок.

Система управления агрегатами в этой схеме должна не только распределять потоки энергии в соответствии с требуемым алгоритмом работы, но и обеспечивать синхронизацию запуска агрегатов и их дальнейшую синхронную работу.

Для гибридных СЭС малой мощности (до 100 кВт) более перспективным является принцип построения, в соответствии с которым суммирование потоков энергии различной физической природы осуществляется на промежуточной шине постоянного тока [4]. Один из вариантов такой системы показан на рис. 3.

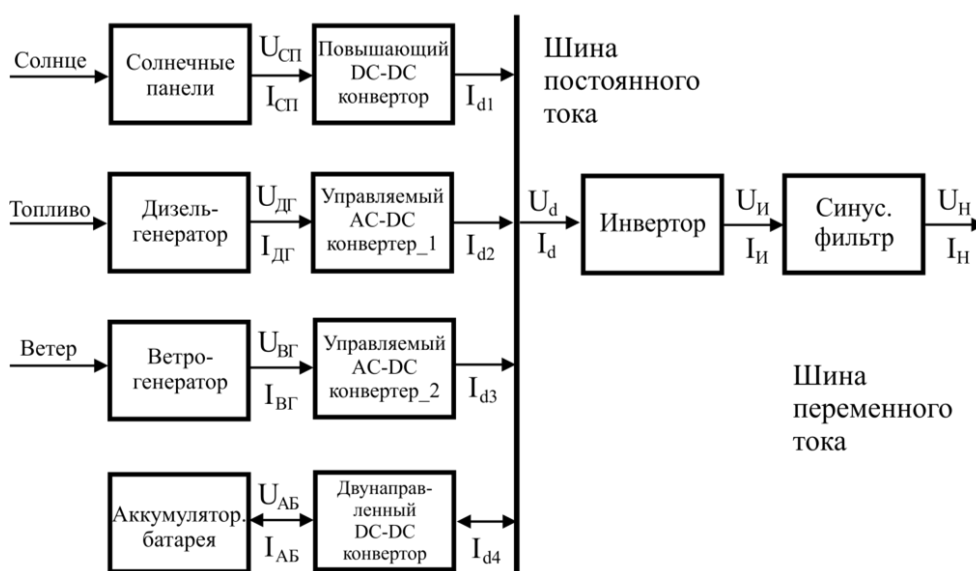


Рис. 3. Гибридная СЭС с общей шиной постоянного тока

Первичными источниками энергии являются дизель-генератор, ветрогенератор и солнечные панели. Дизель-генератор и ветрогенератор вырабатывают электрическую энергию переменного тока, при этом частота и величина напряжения на выходе каждого из этих генераторов зависят от скорости вращения вала первичного двигателя. Так как дизель-генератор и ветрогенератор работают с изменяемой скоростью вращения вала, то возникает задача управления потоками энергии для обеспечения заданного качества электроэнергии в гибридной СЭС при изменении параметров нагрузки и климатических условий. Для решения этой задачи выходы дизель-генератора и ветрогенератора подключены к шине постоянного тока через управляемые AC-DC конвертеры со сглаживающими фильтрами.

Солнечные панели вырабатывают электрическую энергию постоянного тока. Они имеют нелинейные вольт-амперные характеристики, ход которых зависит от уровня энергетической освещенности и температуры панелей. Для согласования солнечных панелей с шиной постоянного тока в схеме на рис. 3 служит повышающий DC-DC конвертер, также оснащенный сглаживающим фильтром.

К шине постоянного тока через двунаправленный DC-DC конвертер подключена аккумуляторная батарея, которая в зависимости от режима работы СЭС заряжается от напряжения на шине постоянного тока при совместной или раздельной работе дизель-генератора, ветрогенератора и солнечных панелей или отдает энергию на шину постоянного тока через двунаправленный DC-DC конвертер.

От шины постоянного тока получает питание инвертор, который формирует на нагрузке переменное напряжение. При этом в заданном диапазоне изменения параметров нагрузки и при любых сочетаниях климатических факторов (скорость ветра, солнечная радиация) на шине переменного тока должна быть электрическая энергия, показатели качества кото-

рой соответствуют требованиям ГОСТ 32144-2013 по частоте, действующему значению напряжения, форме его кривой, симметрии, колебаниям и импульсам напряжения.

Стабильность частоты выходного напряжения инвертора гарантируется применением кварцевого задающего генератора в системе формирования импульсов, управляющих ключами инвертора. Выходное напряжения инвертора имеет ступенчатую форму. Поэтому для обеспечения квазисинусоидальной формы напряжения на шине переменного тока инвертор оснащается синусоидальным фильтром, а управление силовыми ключами инвертора осуществляется с использованием широтно-импульсной модуляции (ШИМ), при которой кривая напряжения формируется в виде импульсов, промодулированных по синусоидальному закону. Однако показатели качества электроэнергии, характеризующие несинусоидальность напряжения: (коэффициенты гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$ и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U), зависят от режима работы инвертора и его нагрузки. Несимметрия напряжений может возникнуть из-за различной загрузки фаз шины переменного тока.

Величина напряжения U_H на шине переменного тока зависит от величины напряжения выходного напряжения U_H и тока нагрузки I_H , который создает падение напряжения на последовательных элементах синусоидального фильтра. Напряжение инвертора U_H зависит от напряжения U_d на шине постоянного тока, которое, в свою очередь, определяется режимом работы источников энергии в схеме рис. 3. Таким образом, ток нагрузки I_H и колебания напряжения U_d являются возмущающими факторами в системе стабилизации напряжения U_H на шине переменного тока [5].

Для компенсации указанных возмущающих воздействий необходимо соответствующим образом регулировать выходное напряжение U_H инвертора. Это

может быть осуществлено изменением ширины его выходных импульсов (глубины модуляции). Однако при определенных значениях возмущающих воздействий этот способ не обеспечивает решение поставленной задачи из-за дефицита энергетических ресурсов.

Для гибридной СЭС с общим звеном постоянного тока уравнение баланса активных мощностей (без учета потерь мощности в преобразовательных устройствах) имеет вид

$$P_{ДГ} + P_{ВГ} + P_{СП} \pm P_{АБ} = P_H, \quad (1)$$

где $P_{ДГ}$, $P_{ВГ}$, $P_{СП}$ – мощности, генерируемые дизель-генератором, ветрогенератором и солнечными панелями соответственно; $P_{АБ}$ – мощность, отдаваемая (забираемая) аккумуляторной батареей; P_H – мощность, потребляемая нагрузкой.

При этом расход дизельного топлива будет минимальным, если аккумулятор находится в заряженном состоянии, а ветрогенератор и солнечные панели работают в режиме выдачи максимальной мощности.

Величина мощности, которую может выдать ветрогенератор при заданной нагрузке, зависит от скорости ветра. Величина мощности на выходе солнечных панелей зависит от солнечной радиации и температуры панелей. Поэтому нагрузочная способность гибридной СЭС является нестационарной величиной и определяется выражением:

$$P_{H, \max} = P_{ДГ}(n) + P_{ВГ}(v) + P_{СП}(R, T) + P_{АБ}(Q). \quad (2)$$

При этом должны выполняться условия:

$$\begin{aligned} P_{ДГ} &\leq P_{ДГ}(n); \quad P_{ВГ} \leq P_{ВГ}(v); \\ P_{СП} &\leq P_{СП}(R, T); \quad P_{АБ} \leq P_{АБ}(Q), \end{aligned} \quad (3)$$

где $P_{ДГ}(n)$ – мощность дизель-генератора при частоте вращения вала n ; $P_{ВГ}(v)$ – мощность, которую может выдать ветрогенератор при скорости ветра v ; $P_{СП}(R, T)$ – мощность, которую могут выдать солнечные панели при солнечной ра-

диации R и температуре панелей T ; $P_{АБ}(Q)$ – мощность аккумуляторной батареи, зависящая от степени ее заряда Q .

Если дизель-генератор работает с фиксированной скоростью вращения вала, то для него ограничение примет вид

$$P_{ДГ} \leq P_{ДГ, \text{ном}}, \quad (4)$$

где $P_{ДГ, \text{ном}}$ – номинальная мощность дизель-генератора.

Надежная работа СЭС возможна только в том случае, если имеется определенный запас по мощности

$$\Delta P \leq P_{H, \max} - P_H. \quad (5)$$

В общем случае этот запас мощности должен обеспечить устойчивый запуск самых мощных электроприемников фермерского хозяйства, например, электродвигателей каких-либо агрегатов и инструментов при условии, что все остальное оборудование, запланированное к применению на текущем интервале времени, уже находится в работе.

Естественно, что величина запаса мощности (5) зависит от характеристик электрооборудования, запитываемого от гибридной СЭС, и обеспечивается за счет соответствующего увеличения установленной мощности дизель-генератора, ветрогенератора, солнечных панелей, аккумуляторной батареи и преобразователей гибридной СЭС.

Из изложенного следует, что запас мощности (5) может быть минимизирован, если он будет рассчитан на пуск только одного мощного электроагрегата. Подключение следующего электроагрегата должно производиться только после того, как завершился пуск предыдущего устройства, и система пришла в установившееся состояние.

На рис. 4 представлена схема гибридной СЭС на основе источников различной физической природы, в которой задача обеспечения ЭМС решается за счет контроля нагрузочной способности источников энергии и управления режимом электропотребления [6].

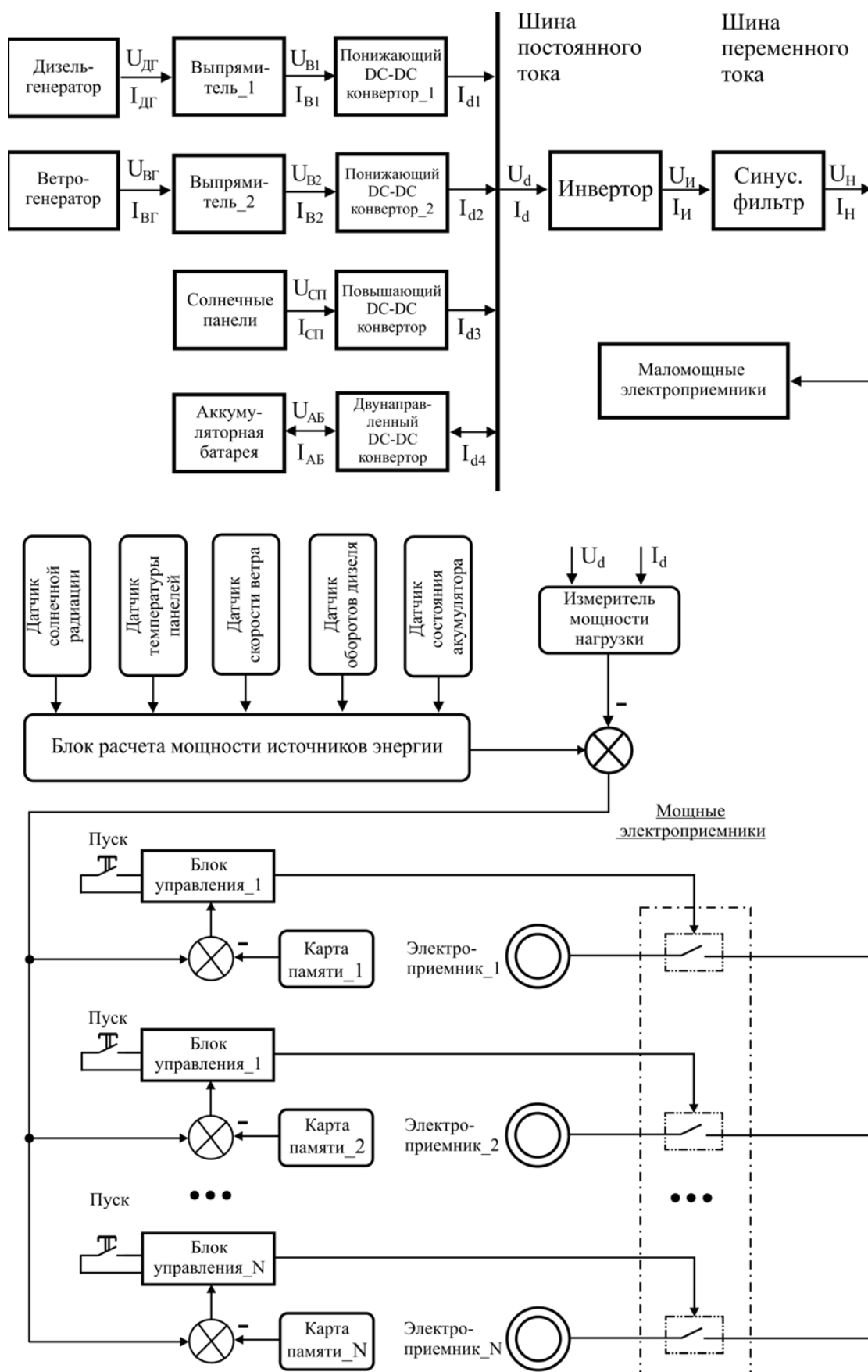


Рис. 4. Схема гибридной СЭС с контролем нагрузочной способности источников энергии и управлением режимом электропотребления

Для контроля нагрузочной способности источников энергии система оснащена датчиками скорости ветра, солнечной радиации, температуры поверхности солнечных панелей, скорости вращения вала дизель-генератора, степени заряда аккумуляторов, выходы которых подключены к блоку анализа нагрузочной способности источников энергии. Кроме того, в системе присутствует измеритель мощности нагрузки СЭС. Он может быть установлен в цепи питания инвертора и выдавать информацию на основании вычисления по формуле

$$P_H = U_d \cdot I_d, \quad (6)$$

где U_d , I_d – средние значения напряжения и тока в цепи питания инвертора.

На основании информации с датчиков солнечной радиации и температуры панелей в реальном масштабе времени вычисляется мощность $P_{СП}(R, T)$, которую можно снять с солнечных панелей при данных условиях. Датчик скорости ветра позволяет оценить мощность $P_{ВГ}(v)$, которой располагает ветрогенератор в текущий момент времени. Информация с датчика скорости вращения вала дизель-генератора преобразуется в сигнал, пропорциональный мощности $P_{ДГ}(n)$ дизель-генератора. Датчик заряда аккумуляторов необходим для оценки их состояния. В итоге на выходе блока, который производит расчет мощности источников энергии, формируется сигнал, который пропорционален нагрузочной способности гибридной СЭС в текущий момент времени.

Этот сигнал поступает на один из входов элемента сравнения, на другой вход которого приходит информация о фактической нагрузке СЭС. В результате на входах

всех блоков управления электрооборудованием рассматриваемой СЭС постоянно присутствуют сигналы, содержащие информацию о запасе мощности в системе.

Для обеспечения ЭМС в гибридной СЭС предлагается также, исходя из мощности электроприемников, разделить их на две группы. Маломощные электроприемники подключаются непосредственно к шине переменного тока. Мощные электроприемники подключаются к шине переменного тока через распределительное устройство, которое содержит коммутационные блоки, оснащенные чипами с информацией об основных характеристиках подключаемого оборудования, такими, как номинальный и пусковой ток, длительность пускового режима и т.п. Поэтому в случае необходимости включения в работу того или иного агрегата вначале производится экспресс-анализ осуществимости такого процесса путем сравнения данных, прошитых в чипе оборудования, и данных на входе блока управления. Если фактическая нагрузочная способность СЭС превышает требуемый для запуска ресурс мощности, то происходит запуск агрегата в работу. В противном случае выдается сигнал, что в данный момент действие невозможно осуществить, ожидайте благоприятной ситуации.

Таким образом, контроль нагрузочной способности источников энергии и управление режимом электропотребления позволяет исключить ситуации, при которых дефицит энергетических ресурсов в гибридной СЭС приводит к нарушению ЭМС и соответствующему отклонению показателей качества электроэнергии от требуемых значений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лукутин Б.В. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении / Б.В. Лукутин, О.А. Суржикова, Е.Б. Шандарова. М.: Энергоатомиздат, 2008. 231 с.

2. A Review of power electronics based microgrids / X. Wang, J.M. Guerrero, F. Blaabjerg, Z. Chen // Journal of Power

Electronics. 2012. Vol. 12. № 1. P. 181-192.

3. Advanced LVDC electrical power architectures and microgrids: A step toward a new generation of power distribution networks / T. Dragicevic, J.C. Vasquez, J.M. Guerrero, and D. Skrlac // IEEE Electr. Mag. 2014. Vol. 2. № 1. P. 54-65.

4. Гибридная система электро-снабжения с объединенным звеном постоянного тока / И.И. Артюхов, С.Ф. Степанов, Е.Т. Ербаев и др. // Вопросы электро-технологии. 2015. № 3 (8). С. 96-100.

5. **Артюхов И.И.** Стабилизация параметров электроэнергии на выходе машино-вентильного генератора / И.И. Артюхов, Д.А. Бочкарев // Проблемы управления, обработки и передачи информации (АТМ-

2013): сб. тр. III Междунар. науч. конф. Саратов: ИД «Райт-Экспо», 2013. Т. 1. С. 11-15.

6. Патент на полезную модель № 1577. Гибридная система автономного электро-снабжения / Е.Т. Ербаев, Г.Н. Тулепова, И.И. Артюхов и др. Республика Казахстан, Приоритет от 29.06.2015, опубл. 29.07.2016. Бюл. № 8.

Артюхов Иван Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электро-снабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Молот Светлана Викторовна – аспирант кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Тулепова Гульсим Нуржановна – аспирант кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., старший преподаватель кафедры «Энергетика» Западно-Казахстанского аграрно-технического университета им. Жангир хана

Ivan I. Artyukhov – Dr.Sc., Professor, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Svetlana V. Molot – Graduate, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Gulsim N. Tulepova – Graduate, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Senior Lecturer, Department of Power Engineering at Zhangir-Khan Western Kazakhstan Agrarian-Technical University

Статья поступила в редакцию 30.05.18, принята к опубликованию 20.06.18

УДК 621.3.032.213

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ
АВТОЭМИССИОННОГО КАТОДА ДЛЯ БЕЗНАКАЛЬНОГО
МАГНЕТРОНА НА ОСНОВЕ АЛМАЗОГРАФИТОВОГО
НАНОКОМПОЗИТА**

Р.К. Яфаров, П.Е. Новиков, В.П. Еремин, Д.О. Кочнев

**INVESTIGATING A POSSIBILITY FOR CREATING AN AUTOEMISSION
CATHODE FOR A NON-SPARK MAGNETRON BASED
ON THE DIAMOND-GRAPHITE NANOCOMPOSITE**

R.K. Yafarov, P.E. Novikov, V.P. Eremin, D.O. Kochnev

Исследованы закономерности влияния величины и длительности импульсов анодного напряжения на величину автоэмиссионного тока и переходные характеристики торцевых двухслойных автоэмиссионных катодов на основе алмазграфитовых наноконпозитов. Показано, что полученные автоэмиссионные катоды способны обеспечить необходимую величину стартового тока для быстрого первичного введения безнакального магнетрона в заданный рабочий режим.

Ключевые слова: алмазграфитовый наноконпозит, автоэмиссионный катод, безнакальный магнетрон, импульсные испытания

Основными преимуществами электровакуумных изделий перед полупроводниковыми принято считать следующие качества: высокая выходная мощность, широкополосность, устойчивость к внешним воздействиям, таким как радиация и перепады температур. Благодаря этим качествам они достаточно уверенно играют ведущую роль в таких областях науки и техники, как системы спутниковой связи, радиолокации, радиоэлектронного противодействия и др. Одним из таких

The regularities of the magnitude and duration effect of anode voltage pulses on the field emission current and transient characteristics of the end-face two-layer field emission cathodes on the basis of diamond-graphite nanocomposites are investigated. It is shown that the obtained field emission cathodes can provide the necessary value of the starting current for fast initial introduction of a non-heated magnetron into the given operating mode.

Keywords: diamond-graphite nanocomposite, autoemission cathode, non-heated magnetron, impulse test

устройств является магнетрон. Он служит для генерирования электромагнитных колебаний сверхвысоких частот, главным образом, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн. Магнетроны применяются в ускорителях заряженных частиц, в передатчиках радиолокационных станций, для сверхвысокочастотного нагрева и в других случаях. Они успешно используются в РЛС самолётов и вертолётв, навигационной аппаратуре морских и речных портов, в охранной аппаратуре,

включая переносную и метеорадары. Ярким примером их востребованности является производство нескольких десятков миллионов в год магнетронов для СВЧ печей в разных странах мира.

В определённых условиях использования электровакуумных приборов значимым является время готовности, то есть время от момента включения устройства до установления рабочего режима. На сегодняшний день, как правило, время готовности составляет несколько минут. В основном, это время затрачивается на прогрев катода, работающего на принципе термоэлектронной эмиссии.

В связи с повышением требований к техническим характеристикам, в основном, аппаратуры специального назначения весьма актуальными становятся работы, направленные на создание ЭВП с безнакальным режимом работы, в которых взамен термокатодов используются так называемые холодные катоды, работающие на принципе автоэлектронной эмиссии. Это позволяет обеспечить практически мгновенную готовность к работе тех радиотехнических систем, в которых они применяются. В сравнении с магнетронами на термокатадах кроме снижения времени готовности магнетроны с холодным катодом имеют такие преимущества, как меньший объем, меньшее энергопотребление и др. [1, 2]. Благодаря этим качествам перспективным является использование безнакального магнетрона, например, для зажигания топлива в двигателях автомобилей.

Научно-технический задел по изготовлению безнакальных магнетронов в России был создан при разработке 3-х сантиметровых и 8-ми миллиметровых импульсных магнетронов [3]. Первые магнетроны с холодным катодом были изготовлены в 1974 году. Однако их время работы было очень невелико [4]. К 2000 году было разработано около десяти разных типов безнакальных магнетронов на длине волны 2 см и 3 см, некоторые из них имели время эксплуатации от 5000 до 10000 ч [4]. Разрабатывался W – диапазонный и терагерцовый безнакальные магнетроны на простран-

ственной гармонике, в которых вторичная эмиссия инициировалась дополнительным термокатодом, расположенным вне пространства взаимодействия [1,2,4-6]. Эти безнакальные магнетроны имеют довольно высокий уровень максимальной и средней мощности, а также возросшее время эксплуатации. Например, типичные значения максимальной и средней мощности W – диапазонных магнетронов составляют, соответственно, 4 кВт и 10 кВт, а время эксплуатации свыше 2000 ч. Однако при создании таких магнетронов возникает множество проблем, основным источником которых является несовершенство катодного узла. В настоящее время конструкции магнетронов и технология производства продолжают совершенствоваться.

Типичная конструкция катодного узла такого магнетрона содержит анод и коаксиально размещённый внутри него безнакальный катод. Последний включает в себя керн из тугоплавкого металла с экранами и расположенными на нём комбинациями чередующихся автоэлектронных эмиттеров (АЭК) в виде шайб и вторично-эмиссионных катодов (ВЭК) в виде втулок (рис. 1). При подаче на анод импульса напряжения испускаемые АЭК электроны под действием скрещенных электрического и магнитного полей движутся по циклоидальным траекториям вокруг катода. Бомбардировка высокоэнергетичными электронами ВЭК приводит к увеличению вторично-электронной эмиссии. Таким образом, ток автоэлектронной эмиссии с АЭК инициирует мгновенный запуск магнетрона в режим генерации, а ВЭК, являясь активатором АЭК, обеспечивает необходимый уровень электрического заряда в пространстве взаимодействия магнетронов и, тем самым, позволяет получать высокую выходную мощность. Процесс активирования заключается в том, что испаренное ВЭК активное вещество, например, барий, частично конденсируясь на рабочей поверхности АЭК, снижает работу выхода электронов и тем самым обуславливает снижение потенциального барьера для туннелирования электронов. Благодаря этому,

несмотря на сравнительно низкое значение напряженности электрического поля у поверхности АЭК ($E \sim 5 \cdot 10^5$ В/см, например, у магнетрона МИ-463), ток полевой эмиссии увеличивается более чем на три порядка. В современных магнетронах в качестве материала АЭК, как правило, служит танталовая или вольфрамовая фольга толщиной 4 мкм, а в качестве вторичных эмиттеров используются прессованные палладий – барьерные втулки – эмиттеры. Для вывода магнетрона в рабочее состояние необходимо обеспечить суммарный ток с четырёх автоэмиссионных дисков порядка 20 мА.

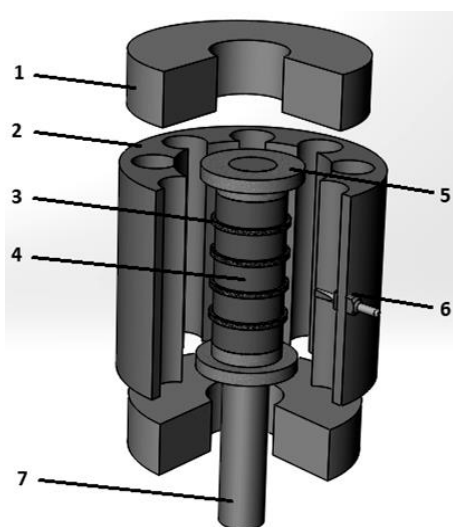


Рис. 1. Конструкция катодного узла безнакального магнетрона: 1 – магнит; 2 – анод; 3 – авто-электронные эмиттеры в виде колец; 4 – вторично-электронные эмиттеры в виде втулок; 5 – экран; 6 – петля связи (антенна)

Степень и стабильность активирования АЭК зависят от физических свойств ВЭК. Эмиссионные параметры и работоспособность последних зависит, в свою очередь, от состава смеси палладий – барьерных порошков, размеров частиц и равномерности их распределения на рабочей части эмиттера [7]. Процесс активирования и эксплуатации эмиттеров происходит в условиях высоких температур (400-800°C в зависимости от параметров магнетрона) и напряженностей внешнего электрического поля, вызывающих интенсивные электронную и ионную бомбардировки. Это приводит к постепенной их деградации, главным образом, за

счет катодного распыления и практически не контролируемого и не управляемого процесса термического переосаждения легирующей примеси между элементами катодного узла. Эти изменения влияют на стабильность работы магнетрона, приводят к изменению частоты генерируемых колебаний, падению электронного КПД, уменьшению долговечности, а также, в ряде случаев, к отказам по запуску магнетронов в радиотехнических системах. Проблема обеспечения надежности работы магнетронов в течение достаточного срока службы дополняется в настоящее время желанием создателей современных радиотехнических систем переходить к все более высоким рабочим частотам – вплоть до терагерцового диапазона. Это позволило бы реализовать надежные системы всепогодного дистанционного обнаружения малоразмерных и малозаметных объектов на поверхности земли, на водной поверхности, в атмосфере, а также системы дистанционного контроля несанкционированного проникновения на охраняемые объекты, включая аэропорты, пути сообщения, культурно-массовые мероприятия и пр. Задача выполнения необходимых требований осложняется тем, что конструкционные элементы в терагерцовых магнетронах оказываются весьма мелкоструктурными, что требует использования специальных высоких технологий.

Анализ литературных данных показывает, что в настоящее время наиболее перспективными для применения в качестве автоэмиссионных источников электронов являются наноуглеродные материалы [8, 9]. Это обусловлено устойчивостью углерода к высоким температурам и бомбардировке ионами остаточных газов, которые присутствуют в приборах, работающих в условиях технического вакуума, а также высокой теплопроводности и возможности снижения работы выхода электронов при определённых структурных модификациях, характерных для алмазного типа гибридизации связей валентных электронов атомов углерода. Установлено, что при оптимальных соотношениях атомов углерода в sp^3 и sp^2 валентном состоянии гибридизации обес-

печивается уменьшение энергии активации проводимости в композитной алмазографитовой структуре и улучшение условий доставки электронов к наноалмазным кристаллитам, которые обладают, по сравнению с графитовыми наноструктурами, пониженной эффективной работой выхода и более высокой деградационной стойкостью. В результате этого за счет повышения прозрачности потенциальных барьеров как в объеме, так и на поверхности углеродной структуры уменьшается порог электрического поля, оставит после приложения которого пленки начинают эмитировать электроны.

Алмазные нанокристаллиты на поверхности углеродной матрицы устойчивы к разогреву и имеют очень малый радиус кривизны (рис. 2). Благодаря этому они являются естественными элементами, усиливающими поле. Перепад между средним минимальным и максимальным радиусами кривизны эмитирующих выступов, полученных в одном технологическом цикле, не велик. Поэтому эффективная эмитирующая поверхность занимает большую часть поверхности пленки.

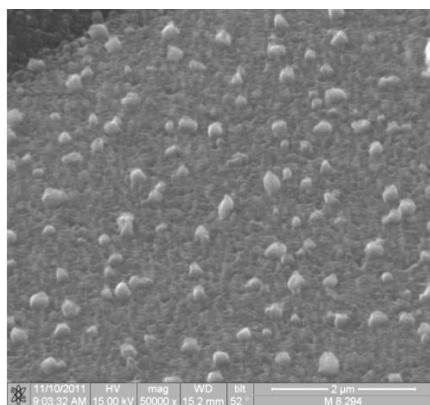


Рис. 2. РЭМ-изображение нанокompозитной алмазографитовой пленки

Дополнительное усиление автоэмиссии связано с тем обстоятельством, что при плазменном осаждении микроструктура алмазографитового нанокompозита формируется из кластеров, размеры которых можно регулировать. При размерах порядка нескольких нанометров структура имеет неоднородный и пористый характер, спо-

собствующая проникновению в нее электрического поля, которое увеличивает эффективную эмиссионную поверхность.

Комплексным результатом предварительных исследований является уменьшение в полученных нанокompозитных структурах порогов полевой эмиссии при одновременном увеличении максимальных плотностей автоэлектронных токов. Уменьшение рабочих напряжений автоэмиссии позволяет увеличить запас электрической прочности синтезированных структур и получить за счет этого источники холодных электронов с повышенными плотностью тока и деградационной стойкостью.

Целью работы являлось изучение возможности использования новых нанокompозитных алмазографитовых автоэмиссионных катодных материалов для повышения стабильности генерации электромагнитных колебаний, долговечности и выходной мощности магнетронов с мгновенным запуском.

Методика и результаты экспериментов. В модернизируемой конструкции безнакального магнетрона с четырьмя парами танталовых АЭК и палладий-бариевых втулок ВЭК длина эмитирующей окружности каждого АЭК, имеющего диаметр 3,9 мм, составляет 12,246 мм. При общем пусковом анодном токе магнетрона около 20 мА автоэмиссионный ток с единицы длины окружности АЭК в этом случае не должен быть меньше 0,41 мА. В обеспечение этого требования исследовались автоэмиссионные характеристики двухслойного автоэмиссионного катода на основе алмазографитовой нанокompозитной плёнки (рис. 3). Плазмохимическое осаждение нанокompозитной алмазографитовой пленочной структуры проводилось на поликоровые подложки в вакуумной установке с использованием СВЧ ионно-плазменного источника на частоте 2,45 ГГц. Мощность СВЧ излучения и индукция магнитного поля составляли 250 Вт и 875 Гс. Величина магнитного поля обеспечивает выполнение условий электронного циклотронного резонанса, при котором степень ионизации плазмы составляет около 5%.

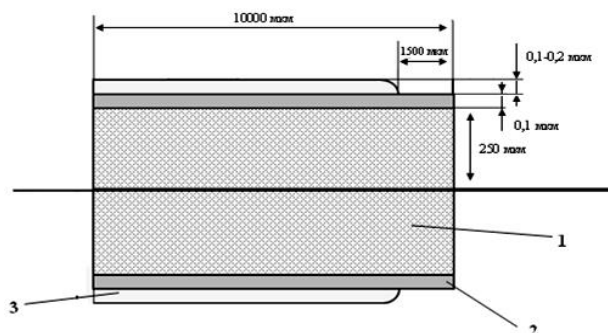


Рис. 3. Эскиз двухслойного автоэмиссионного катода на основе алмазграфитовой нанокompозитной плёнки: 1 – подложка (поликор); 2 – алмазграфитовый нанокompозит; 3 – контактный слой (Ni)

Осаждение осуществлялось на обе стороны подложки при температуре 300°C с использованием в качестве рабочего вещества паров этанола [10, 11]. Толщины алмазграфитовых пленочных структур и никелевых контактов на них составляли 0,1 мкм. Исследования автоэмиссионных свойств двухслойного автоэмиссионного катода осуществлялись в условиях высокого вакуума (10^{-5} Pa) на диодной структуре, способной изменять расстояние между электродами с точностью до 1 мкм. Диаметр рабочей поверхности вольфрамового анода составлял 3 мм. Расстояние между катодом и анодом в процессах автоэмиссионных измерений было равным 20 мкм.

Исследовано влияние длительности импульсов (10, 30, 50 мкс) и амплитуды напряжений (от 10 В до 3,5 кВ) при различных частотах повторения импульсов (и скважности) на порог начала автоэмиссии, максимальные плотности автоэмиссионных токов, стабильность воспроизведения ВАХ в процессах тренировок и длительных импульсных измерений. Пороги начала автоэмиссии определялись по напряженности электрического поля, при которой токи автоэмиссии составляли фиксируемую минимальную величину равную 5 мкА. При измерениях автоэмиссионных ВАХ минимальная амплитуда стартового импульса и интервал между возрастающими амплитудами напряжений регулировались в интервале от 10 В до 100 В. Длительность импульсных испытаний составляла 5 и 10 минут.

Установлено, что в процессах тренировочных импульсных испытаний не зависимо от их длительностей с каждым последующим циклом измерений ВАХ флуктуации автоэмиссионных токов нанокompозитных алмазграфитовых пленочных структурах уменьшаются. Получение устойчивых и воспроизводимых ВАХ достигается, как правило, после 3-5 тренировочных циклов (рис. 4).

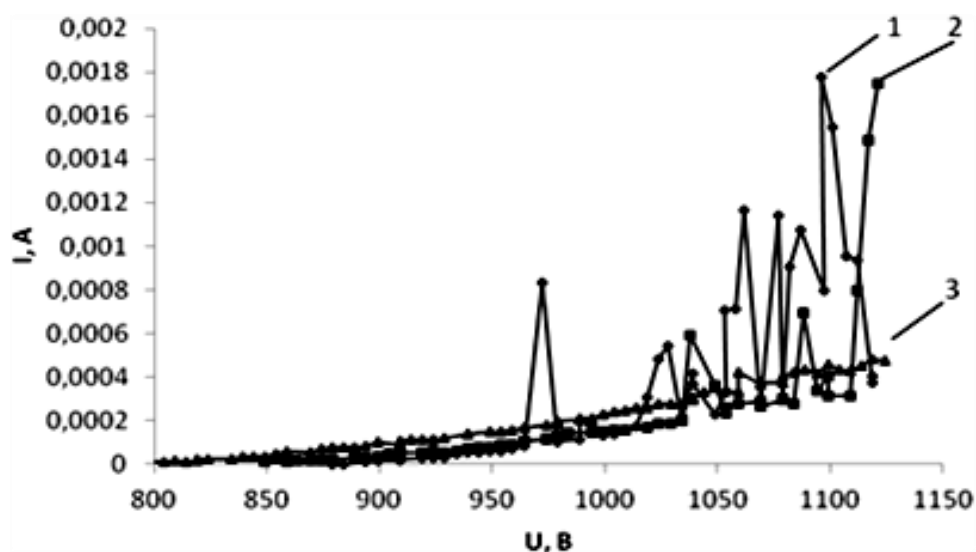


Рис. 4. Начальные участки автоэмиссионных ВАХ алмазграфитовых катодных структур при различных тренировочных циклах измерений (цифры на кривых соответствуют их очередности)

На рис. 5 приведена вольтамперная характеристика АЭК с двусторонним осаждением алмазграфитовой пленочной структуры в линейных координатах и координатах Фаулера – Нордгейма. Видно, что в импульсном режиме автоэмиссионный ток с двухслойного АЭК с длиной торца алмазграфитовой пленки 3 мм превышает 3 мА. Это более, чем в два раза превышает требуемое значение автоэмиссионного тока с единицы длины окружности автоэмиссионного катода. Полученная вольтамперная характеристика, построенная в координатах

Фаулера – Нордгейма, линейна как в области высоких, так и в области низких напряжений, что указывает на автоэлектронный механизм эмиссионного тока. Наличие излома ВАХ в координатах Фаулера – Нордгейма вероятнее всего связано с тем, что автоэмиссия осуществляется не из металла, для которого получена формула Фаулера – Нордгейма, где отсутствует проблема поставки электронов к эмиссионным центрам, а не композитного алмазграфитового материала с определенной энергией активации электропроводности (рис. 5 б).

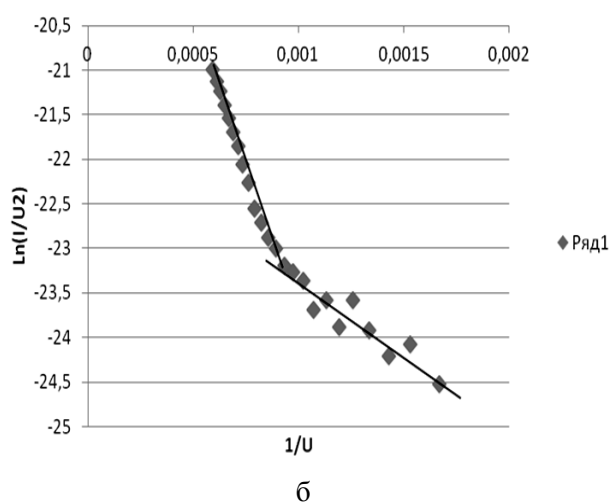
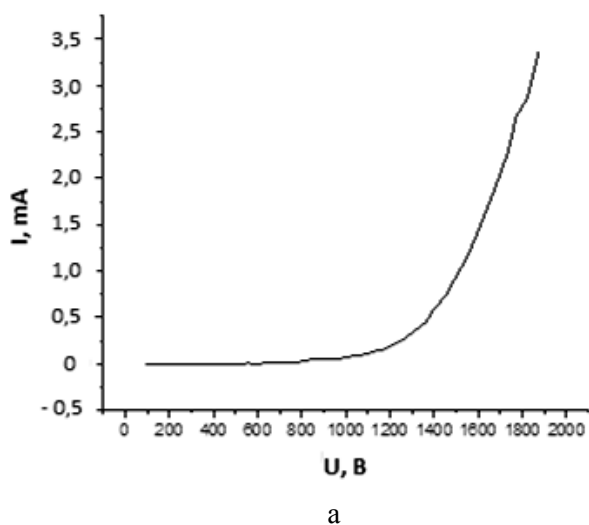


Рис. 5. ВАХ двухслойного автоэмиссионного катода в линейных (а) и координатах Фаулера – Нордгейма (б)

Установлено, что вид зависимостей анодного тока в процессах длительных импульсных испытаний определяется длительностью импульсов и величиной амплитуды анодного напряжения, при котором образец исследуется (рис. 6). При амплитудах напряжений вблизи порога автоэмиссии зависимости анодного тока имеют вид шумовых характеристик, огибающие которых при увеличении количества импульсов выходят на насыщение (рис. 6 а). Величина стационарно уровня полевого тока и время выхода на него тем меньше, чем больше длительность импульса при заданной его амплитуде. При средних значениях амплитуд импульсов напряжений характер зависимостей автоэмиссионных токов от длительности испытаний изменяется на противоположный:

после небольшого спада, они становятся практически не зависимыми от количества импульсов (рис. 6 б). Наибольшая величина и спад амплитуды автоэмиссионных токов реализуются при наименьших длительностях импульсов напряжений. При больших длительностях импульсов реализуется самый быстрый выход на стационарный режим генерирования полевого тока, хотя его величина оказывается меньше, чем в случае импульсов с меньшей длительностью.

Обсуждение результатов. Наблюдаемое влияние длительности и амплитуды импульсов анодного напряжения на изменения амплитуд автоэмиссионных токов при длительных импульсных испытаниях может быть интерпретировано с использованием теории токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ), и совре-

менных представлений о полевой эмиссии электронов, основывающихся на теории туннелирования электронов через тре-

угольный потенциальный барьер [12, 13], следующим образом.

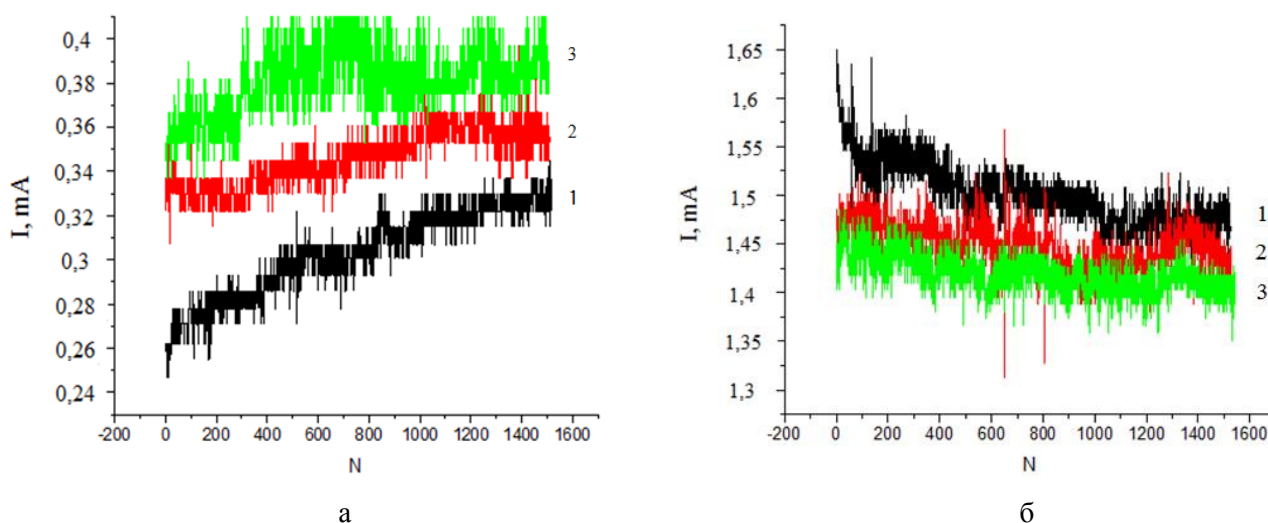


Рис.6. Зависимости амплитуд автоэмиссионных токов от количества импульсов анодного напряжения с амплитудой 1200 В (а) и 1600 В (б) различной длительности: 1-10 мкс; 2-30 мкс; 3-50 мкс

Теория ТОПЗ применима к высокоомным полупроводниковым материалам с ловушками захвата носителей. Согласно теории эти ловушки создают глубокие уровни энергии в запрещенной зоне (так что обратным тепловым выбросом электронов можно пренебречь) и равномерно распределены по объему полупроводника.

Получение АЭК на основе нанокомпозитных алмазографитовых покрытий осуществляется в высокоионизированной микроволновой плазме паров этанола низкого давления на диэлектрические поликорковые подложки. Процесс осаждения осуществляется в неравновесных условиях. Это обусловлено тем, что обмен электронами между бомбардирующими углеродосодержащими ионами и поверхностью таких подложек, на которые осуществляется осаждение, протекают в условиях нехватки электронов [14]. Результатом этого является образование в объеме и на поверхности углеродного покрытия дефектов с локализованными электронными состояниями, которые проявляют себя преимущественно как акцепторные ловушки захвата.

При полевой эмиссии в катодной матрице за счет тянущего электрического поля анода организуется транспорт электронов к

поверхностным эмиссионным центрам. Часть электронов захватываются акцепторными ловушками захвата. Это приводит к возникновению электростатического встроенного потенциала, который экранирует внешнее поле анода и уменьшает ток электронов к поверхности катодной матрицы. При последующих импульсах анодного напряжения той же величины происходит постепенное заполнение ловушек захвата и увеличение доли электронов, прошедших к эмиссионным центрам и протуннелировавших к аноду.

При увеличении длительностей импульсов напряжений благодаря увеличению кинетической энергии электронов, приобретаемой электронами за время действия импульса, увеличиваются прозрачность потенциальных барьеров для их туннелирования и скорость заполнения ловушечных центров. Вследствие этого, с одной стороны, с увеличением длительностей импульсов увеличиваются автоэмиссионные токи, а с другой, уменьшается количество импульсов анодного напряжения, необходимых для полного заполнения ловушек захвата и выхода амплитуд автоэмиссионных токов на стационарные значения (рис. 6 а, кривые 2, 3).

Согласно представлениям Фаулера и Нордгейма при увеличении анодных напряжений автоэмиссионный ток увеличивается экспоненциально. Благодаря этому, при коротких длительностях импульсов большая часть электронов, инжектированных полем анода к поверхностным эмиссионным центрам, туннелирует к аноду и не остается в ловушках захвата. С увеличением количества импульсов напряжений происходит постепенное заполнение поверхностных ловушек захвата и увеличение встроенного заряда. Это увеличивает работу выхода электронов и ограничивает дальнейшее поступление электронов к эмиссионным центрам. Результатом этого является выход автоэмиссионного тока на некоторый стационарный уровень (рис. 6 б, кривая 1).

С увеличением длительности импульсов при той же амплитуде анодного напряжения, благодаря пропорциональному длительности импульсов увеличению энергии электронов, заполнение глубоких ловушек захвата происходит более интенсивно. После полного их заполнения устанавливается некоторая стационарная амплитуда тока полевых электронов, которая тем меньше, чем больше длительность импульсов и энергия электронов, способных заполнять глубокие центры захвата. При этом реализуется закономерность: чем больше длительность импульсов, тем меньше амплитуда автоэмиссионных токов и тем быстрее амплитуды автоэмиссионных токов выходят на соответствующие стационарные уровни (рис. 6 б, кривые 2, 3).

Итак, испытания двухстороннего автоэмиссионного катода на основе алмазграфитового нанокompозита показали, что данные АЭК способны обеспечить необходимую величину стартового тока для быстрого первичного введения магнетрона в номинальный режим. Структура АЭК на основе алмазграфитового нанокompозита обладает высокой устойчивостью к ионному распылению и температуре, что является важным преимуществом в обеспечение долговременной стабильности выходной мощности магнетрона по сравнению с АЭК на танталовой фольге.

Требуемые автоэмиссионные токи в предложенной конструкции достигаются при напряжении 1500-1600 В. Напряженность поля в зазоре между анодом и катодом составляет при этом около $1 \cdot 10^6$ В/см.

Долговременные импульсные испытания полученных катодных структур показали, что выход на стационарный режим работы безнакального магнетрона зависит от амплитуды и длительности импульсов анодного напряжения (требуемого стартового тока). После окончания переходного периода для данной длительности импульсов напряжений работа выхода стабилизируется на некотором эффективном значении, а амплитуды автоэмиссионных токов выходят на соответствующие стационарные величины. При одинаковой амплитуде импульсов с увеличением их длительности переходных периодов уменьшаются. Это обусловлено тем, что с увеличением длительностей импульсов напряжений увеличивается энергия электронов, которая способствует более быстрому заполнению ловушек захвата в микроструктуре автокатада и переходу к участку с резким ростом тока, который по терминологии теории ТОПЗ называется участком полного заполнения ловушек (ПЗЛ) [12]. Захваченные ловушками электроны формируют в приповерхностной области катодной матрицы встроенный заряд, индуцированное электрическое поле которого увеличивает работу выхода электронов. Результатом этого является уменьшение амплитуды автоэмиссионного тока как с увеличением длительностей импульсов напряжений, так и с увеличением их количества.

После окончания действия импульсов напряжения состояние матрицы является неравновесным. Поэтому электроны под действием тепловых флуктуаций постепенно покидают ловушки захвата и катодная матрица возвращается в исходное термодинамически равновесное состояние.

Установленные закономерности влияния амплитуды и длительностей импульсов анодного напряжения на величину амплитуды импульсов автоэлектронного тока и длительность их выхода на стационарный режим, позволяют разработать оптималь-

ные алгоритмы стартового изменения амплитуды и длительности импульсов анодного напряжения для обеспечения заданных длительностей выхода безнакального

магнетрона на основе алмазографитового АЭК на стационарные режимы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10033).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Schünemann K.** Self-consistent simulation of the spatial-harmonic magnetron with cold secondary emission cathode / K. Schünemann, S.V. Sosnytskiy, D.M. Vavriv // IEEE Trans. Electron Devices. May 2001. Vol. 48. № 5. P. 993-998.

2. **Sosnytskiy S.V.** Theory of the spatial-harmonic magnetron: An equivalent network approach / S.V. Sosnytskiy, D.M. Vavriv // IEEE Trans. Plasma Sci. Jun. 2002. Vol. 30. № 3. P. 984-991.

3. **Гурко А.А.** Магнетроны миллиметрового диапазона длин волн / А.А. Гурко. М., 2015. С. 128-149.

4. **Zybin M.N.** Cold cathode magnetron: Yesterday, today and tomorrow. JSC Pluton, Moscow, Russia. [Online]. Available: <http://www.microwavejournal.com>. (Jun. 2012).

5. 3-D simulation of millimeter-wave cold secondary-emission cathode drift-orbital resonance magnetrons / V.D. Yeryomka, M.A. Kopot, O.P. Kulagin, V.D. Naumenko // Proc. IVEC. 2006. P. 349-350.

6. Toward terahertz magnetrons: 210-GHz spatial-harmonic magnetron with cold cathode / N.I. Avtomonov, V.D. Naumenko, D.M. Vavriv et al. // IEEE Trans. Electron Devices. Dec. 2012. Vol. 59. № 12. P. 3608-3611.

7. Магнетрон с безнакальным катодом / И.П. Ли, Б.Ч. Дюбуа, Н.В. Каширина, С.В. Комиссарчик, Н.Д. Лифанов, М.Н. Зы-

бин. Патент на изобретение РФ № 2380784 от 24.10. 2008.

8. **Яфаров Р.К.** Получение нанокпозиционных углеродных материалов для сильноточных полевых источников электронов / Р.К. Яфаров, Н.М. Котина // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2016. Т. 13. № 4. С. 534-539.

9. Автоэлектронная и взрывная эмиссия из графеноподобных структур / Г.Н. Фурсей, М.А. Поляков, А.А. Кантонистов и др. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 6. С. 71-77.

10. **Яфаров Р.К.** Получение наноалмазных композиционных материалов в плазме микроволнового газового разряда низкого давления / Р.К. Яфаров // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 1. С. 42-48.

11. **Яфаров Р.К.** Физика СВЧ вакуумноплазменных нанотехнологий / Р.К. Яфаров. М.: Физматлит, 2009. 216 с.

12. **Калашников С.Г.** Физика полупроводников / С.Г. Калашников, В.Л. Бонч-Бруевич. М.: Наука, 1977. 672 с.

13. **Усанов Д.А.** Методы получения и исследования самоорганизующихся наноструктур на основе кремния и углерода / Д.А. Усанов, Р.К. Яфаров. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2011. 126 с.

14. **Оура К.** Введение в физику поверхности / К. Оура, В.Г. Лифшиц, А.А. Саранин. М.: Наука, 2006. 490 с.

Яфаров Равиль Кяшшафович – доктор технических наук, заведующий лабораторией «Субмикронная электронно-ионная технология» Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Новиков Павел Евгеньевич – студент бакалавриата кафедры «Физика твердого тела» Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

Ravil K. Yafarov – Dr.Sc., Professor Head: Laboratory of Submicron Electron-Ion Technology, Saratov branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics

Pavel E. Novikov – Undergraduate, Department of Solid State Physics, Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky

Еремин Валерий Павлович – главный конструктор по НИОКР ПАО «Тантал», почетный работник электронной промышленности СССР

Valery P. Eremin – Chief Designer, NIOKR PAO *Tantal*, Honored Worker of the USSR Electronics Industry

Кочнев Денис Олегович – инженер ОКБ ПАО «Тантал», аспирант Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

Denis O. Kochnev – Engineer, OKB PAO *Tantal*, Postgraduate at Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky

Статья поступила в редакцию 15.06.18, принята к опубликованию 20.06.18

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

В разделе «Летопись» можно опубликовать воспоминания, рассказ, информацию об ученых, преподавателях, представителях промышленности, бизнеса, работающих в области электротехнологии.

ПАРАМЕТРЫ ОБМОТКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗДЕЛИЯ

П.А. Кошелев, С.В. Парамонов

PARAMETERS FOR THE WINDINGS OF ELECTROMAGNETIC ITEMS

P.A. Koshelev, S.V. Paramonov

Рассмотрены методы оценки значений параметров электромагнитного изделия, не предусмотренных при его проектировании, но образующихся в процессе изготовления.

Такие параметры могут существенно повлиять на надёжность устройства, содержащего элементы, чувствительные к перенапряжениям, в частности, полупроводниковые приборы.

Предложена методика анализа распределённых параметров, основанная на эквивалентной замене их на совокупность дополнительных элементов и вычисление сосредоточенных параметров каждого дискретного элемента с последующим объединением результатов.

Представлен возможный метод компенсации последствий влияния паразитных ёмкостей и индуктивностей электромагнитного изделия.

Расчёты выполнены с применением современных математических программ.

Ключевые слова: межвитковая ёмкость, цепная схема, перенапряжение, корректирующая цепь, передаточная функция, математическая модель

Надёжная работа элементов в оборудовании силовой электроники требует, чтобы напряжения на силовых элементах и скорости нарастания прямого напряжения (dU/dt) поддерживались в допустимых пределах.

Полупроводниковые приборы, в особенности вентили (транзисторы, тиристоры, диоды), чувствительны к перенапряжениям и к большим скоростям нарастания прямого или обратного напряжения.

Причины перенапряжений могут быть различными.

The article considers the methods for estimating the parameters of electromagnetic units not envisaged when designing the unit but emerging in the process of its fabrication.

These parameters can significantly affect reliability of the device containing the elements sensitive to overvoltage, in particular, semiconductor items.

A method for analyzing the distributed parameters based on their equivalent changeover by a set of additional components, and computation of the lumped parameters of each discrete element with a subsequent combination of the results is proposed.

A method is suggested applied to compensate the consequences of the impact of stray capacitances and inductance of electromagnetic items.

The calculations are made using the cutting-edge mathematical programs.

Keywords: interturn capacity, recurrent circuit, overvoltage, correcting circuit, gear function, mathematical model

Периодические коммутационные перенапряжения возникают при закрывании вентиля из-за большой скорости спада (обрыва) прямого или обратного тока.

Перенапряжения возникают при включении и отключении ненагруженного трансформатора, резких изменениях выпрямленного тока в индуктивностях.

Они также могут проявляться из-за резонансных явлений, обусловленных индуктивностями и паразитными ёмкостями обмоток электромагнитных изделий.

Обратные напряжения, превышающие допустимые значения, воздействующие на вентиль в течение нескольких микросекунд, могут привести к электрическому пробоя р-п перехода.

Система защиты вентиля преобразователя должна обеспечить ограничение всех видов перенапряжений до допустимого уровня.

Средства защиты подразделяются на активные и пассивные.

К первым можно отнести газоразрядные и полупроводниковые приборы со специальными вольтамперными характеристиками.

Для защиты силовых полупроводниковых ключей от перенапряжений при коммутации цепей с индуктивностями и атмосферных перенапряжений используют газовые разрядники, варисторы и супрессоры.

Газовые разрядники применяются в первую очередь для защиты от атмосферных перенапряжений.

Принцип действия основан на пробое промежутка между электродами, находящимися в среде инертного газа.

Газовый разрядник имеет скорость срабатывания 0,1-1 микросекунды, что не всегда достаточно для обнаружения и устранения аварийного режима.

У разрядника в момент пробоя сопротивление снижается практически до нуля.

Он, защищая от перенапряжений, создает короткое замыкание, которое должно быть отключено автоматическим выключателем или предохранителем, что ограничивает область его применения в современных автоматизированных электротехнических установках.

Варисторы – полупроводниковые резисторы, электрическое сопротивление которых существенно зависит от приложенного напряжения.

В нормальном режиме работы сопротивление варистора велико и он не оказывает влияния на схему.

При увеличении напряжения выше заданного уровня сопротивление на несколько порядков уменьшается, тем самым импульс перенапряжения поглощается внутри прибора, причём может выделяться весьма

большая импульсная мощность, иногда повреждающая сам варистор.

Супрессоры – защитные диоды по принципу действия и характеристикам аналогичные стабилитронам.

Супрессоры обладают высоким быстродействием в отличие от газовых разрядников, которые из-за значительного времени срабатывания не решают проблемы защиты многих полупроводниковых приборов и микросхем, для которых не допустимы начальные выбросы напряжения, пропускаемые разрядниками.

Перечисленные активные элементы реагируют только на эпизодические всплески напряжений и не предназначены для ожидания изменений режимов установки, в том числе и штатных.

При разработке и проектировании преобразовательных устройств с полупроводниковыми приборами, подверженными воздействию коммутационных перенапряжений, их защита во многих случаях не предусматривается.

Это может привести к выходу из строя элементов, отказу или неправильному действию устройства.

В настоящее время определению параметров пассивных защитных цепей и оценке их влияния на работу преобразовательных устройств не уделяется достаточного внимания.

В литературе описаны разнообразные методы оценки и расчёта паразитных параметров цепей, например, формула G. Grandi (1) [1, 2] для ёмкости катушки:

$$C_g = \frac{\varepsilon_0 \pi^2 D}{\left[(N-1) \ln \left\{ \left(\frac{p}{d} \right) + \sqrt{\left[\left(\frac{p}{d} \right)^2 - 1} \right] \right\} \right]} \cdot (1)$$

В (1) N – число витков катушки; ε_0 – диэлектрическая постоянная; D – диаметр катушки, см; p – шаг намотки, см; d – диаметр провода, см.

Многие методики подвергаются критической оценке исследователей, например [1]:

«Это была попытка современной реанимации электростатической модели катушки,

которая, как показано в случае с формулой Палермо, далека от действительной картины.

Это яркий пример, когда "бумажная" теория не проверяется экспериментом и тем не менее выдается за истину. Из формулы следует вывод: чем больше витков имеет катушка, то есть чем длиннее она — тем меньше паразитная емкость, что абсолютно противоречит практике».

Результат вычисления по (1) для данного приведённого примера около 0,85 пФ, что не соответствует эксперименту и существенно меньше ёмкости 2 витков обмотки.

В монографии [3] паразитная ёмкость вычисляется через запасённую энергию в слое (слоях) обмотки (обмоток).

Формулы неудобны для практических расчётов, требуют предварительного вычисления ряда вспомогательных коэффициентов, в которых не всегда учитывается и (или) присутствует размерность физических величин.

В этих и других работах авторы оперируют понятием «ёмкость катушки».

В действительности обмотка (катушка) характеризуется распределёнными параметрами, однако методы анализа длинных линий вряд ли применимы к этому изделию.

Обмотке, как правило, свойственна регулярность повторения ячеек (витков), имеющих идентичные электромагнитные характеристики.

В этой связи представляется целесообразным применение методов расчёта цепных схем.

В состав высокочастотных и импульсных преобразователей входят электромагнитные элементы (трансформаторы, дроссели) с небольшой индуктивностью, однослойными обмотками, быстродействующие ключи (транзисторы).

В предлагаемой работе изложена методика анализа распределённых параметров однослойной обмотки, основанная на эквивалентной их замене совокупностью дискретных элементов и вычислением сосредоточенных параметров.

В результате, в зависимости от цели исследования, находится не ёмкость или индуктивность, а комплексное сопротив-

ление изделия, операторное сопротивление, передаточная функция, используемые для проектирования всего устройства и защитных цепей.

Методика может быть применена и для многослойных обмоток после несложного редактирования программ.

Рассмотрим пример трансформатора с однослойной первичной обмоткой (рис. 1).

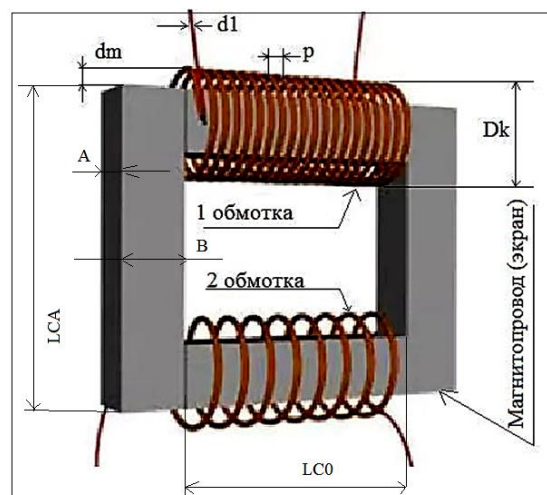


Рис. 1

Пояснения к рис. 1, а также некоторые результаты вычислений на рис. 2, 3 (фрагменты MAPLE файла).

Здесь обмотка представлена в виде цепной схемы с повторяющимися комбинациями двухполюсников (рис. 4 а).

На рис. 4 б, с соответственно показан общий вид схем двухполюсников, составляющих параллельные и последовательные элементы цепной схемы по рис. 3.

Анализ цепных схем может быть проведён с применением аппарата решётчатых функций [4].

В данной задаче применён метод бесконечных лестничных дробей [5, 6].

Вычислительная база метода может быть реализована с применением программных пакетов MAPLE, MATLAB и при их сочетании.

Синтаксис формирования лестничной дроби в системе MAPLE 12 (2):

```
M = 20; for n from N-1 by -1 to 1 do
w[n] := z[2·n-1] + 1/(1/z[2·n] + 1/w[n + 1])
end do. (2)
```

```

>  $\epsilon_0 := 8.854 \cdot 10^{-12} : \# \frac{\Phi}{\text{м}}$  – Абсолютная диэлектрическая проницаемость
>  $\epsilon := 4 :$  # Относительная диэлектрическая проницаемость материала изоляции
>  $\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} : \# \frac{\Gamma_H}{\text{м}}$  Абсолютная магнитная проницаемость
>  $\mu_r := 2500 :$  # МП материала, относительная
>  $d1 := 0.003 :$  # м Ширина шины обмотки
>  $h1 := 0.002 :$  # м Толщина шины обмотки
>  $p := 0.0035 :$  # м Расстояние между витками
>  $Dk := 0.05 :$  # м Диаметр витка
>  $lw := \pi \cdot Dk :$  # м Длина витка
>  $S1 := d1 \cdot lw :$  # м2 Площадь поверхности 1 витка
>  $NN := 10 :$  # Общее количество витков
>  $N := 1 :$  # Количество витков для расчёта параметров
>  $S := S1 \cdot N :$  # м2 Общая площадь витка
>  $dm := 0.002 :$  # м Расстояние от витка до экрана (магнитопровода)
    
```

Рис. 2

```

>  $C2 := \text{evalf}\left(\frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S}{dm}\right) :$  # Ёмкость витка по отношению к экрану, Ф
>  $S1 := lw \cdot h1 :$  # м2 Площадь торца витка
>  $C1 := \text{evalf}\left(\frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S1}{p}\right) :$  # Ёмкость между соседними витками, Ф
> #-----
> # Параметры магнитопровода (МП)
>  $A := 0.03 :$  # м Толщина МП
>  $B := 0.03 :$  # м Ширина МП
>  $LC0 := 0.035 :$  # м Длина участка стержня
>  $LCA := 0.3 :$  # м Длина ярма
>  $Sm := A \cdot B :$  # м2 Площадь сечения МП
>  $DH0 := 0.0005 :$  # м Размер суммарного зазора в МП
>  $lm := 2 \cdot ((LCA - B) + (LC0 + B)) + DH0 :$  # м Длина средней линии МП
>  $Me := (\mu_0 \cdot \mu_r) / (1 + \mu_r \cdot DH0 / lm) :$  #  $\frac{\Gamma_H}{\text{м}}$  Экв. магн. проницаемость

>  $L1 := \text{evalf}(Me \cdot N^2 \cdot Sm / lm) :$  # Гн Индуктивность 1 витка обмотки
>  $L1 := 0.00000147$ 

>  $C2;$  # Ёмкость витка по отношению к экрану, Ф
>  $8.35 \cdot 10^{-12}$ 

>  $C1;$  # Ёмкость между соседними витками, Ф
>  $3.17 \cdot 10^{-12}$ 
    
```

Рис. 3

В (2) M – количество двухполюсников в цепной схеме (рис. 4 а) N – количество двухполюсников в последовательной и параллельной цепях соответственно.

Организация цикла вычислений в системе MAPLE 12:

$$\text{for } n \text{ from } N-1 \text{ by } -1 \text{ to } 1 \text{ do } w[n] := z[2 \cdot n - 1] + \frac{1}{\frac{1}{z[2 \cdot n]} + \frac{1}{w[n+1]}} \text{ end do:} \quad (3)$$

Результат – лестничная дробь для $M = 20$ показан на рис. 5.

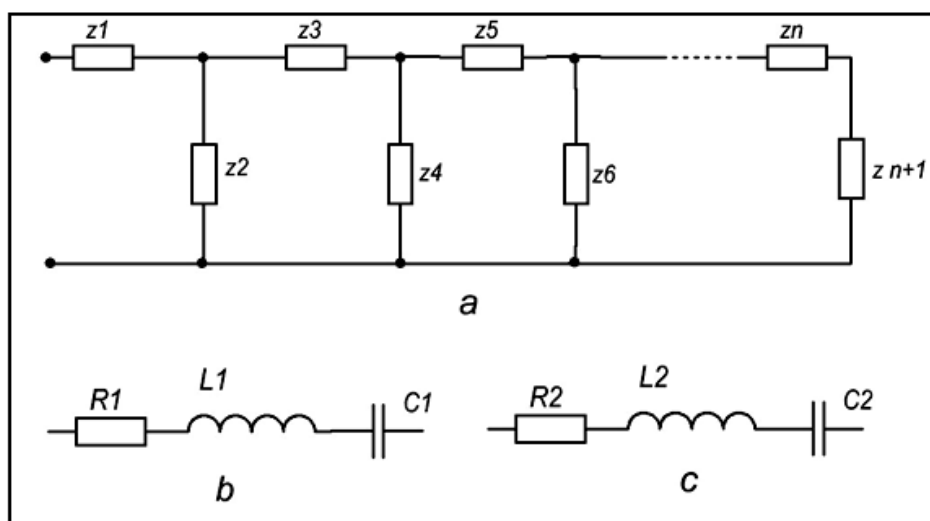


Рис. 4

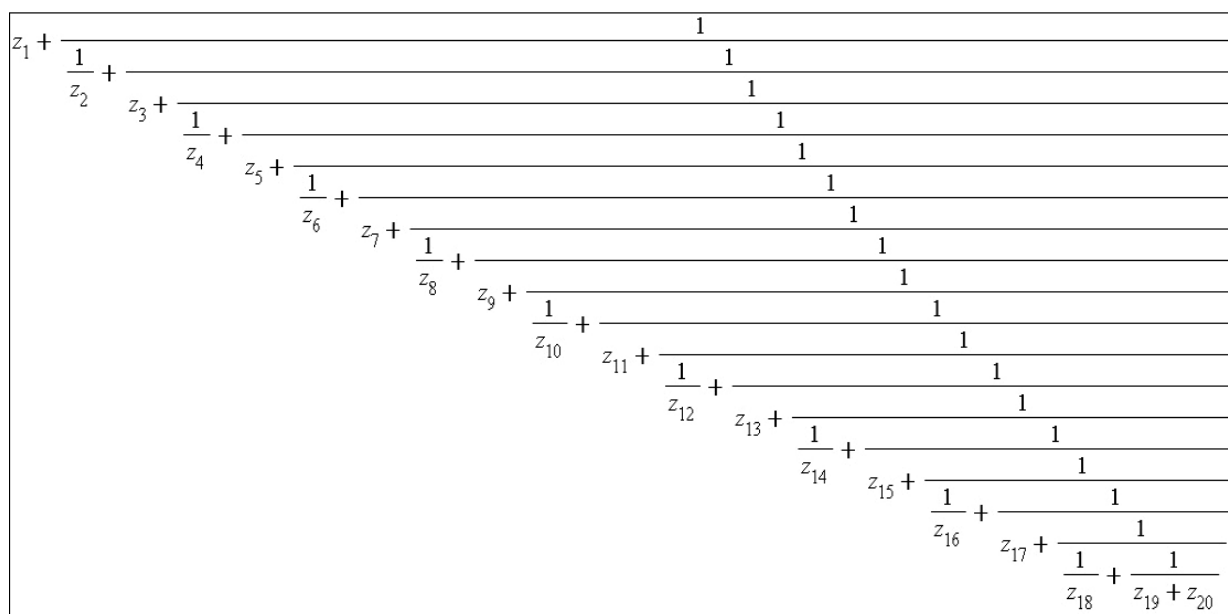


Рис. 5

В общем случае может быть учтено наличие в двухполюсниках активных и реактивных элементов. Сопротивления последовательных и параллельных двухполюсников по рис. 4 *b*, с обозначены соответственно zs , zp

$$zs := R_1 + I\omega L_1 + \frac{1}{I\omega C_1}; \quad (4)$$

$$zp := R_2 + I\omega L_2 - \frac{1}{I\omega C_2}. \quad (5)$$

По результатам предварительного расчёта (рис. 2, 3):

$$R1 := 0.1e-2; R2 := 0; L1 := 0.147e-5; L2 := 0; C1 := 0.317e-11; C2 := 0.835e-11. \quad (6)$$

Переменные в составе лестничной дроби:
 $z[1] := zs; z[2] := zp; z[3] := zs; z[4] := zp;$
 $z[5] := zs; z[6] := zp; z[7] := zs; z[8] := zp;$
 $z[9] := zs; z[10] := zp; z[11] := zs; z[12] := zp;$
 $z[13] := zs; z[14] := zp; z[15] := zs; z[16] := zp;$
 $z[17] := zs; z[18] := zp; z[19] := zs; z[20] := zp$

На рис. 6 показана структура измерительной схемы сопротивления.

На рис. 7 приведена частотная зависимость модуля сопротивления цепной схемы.

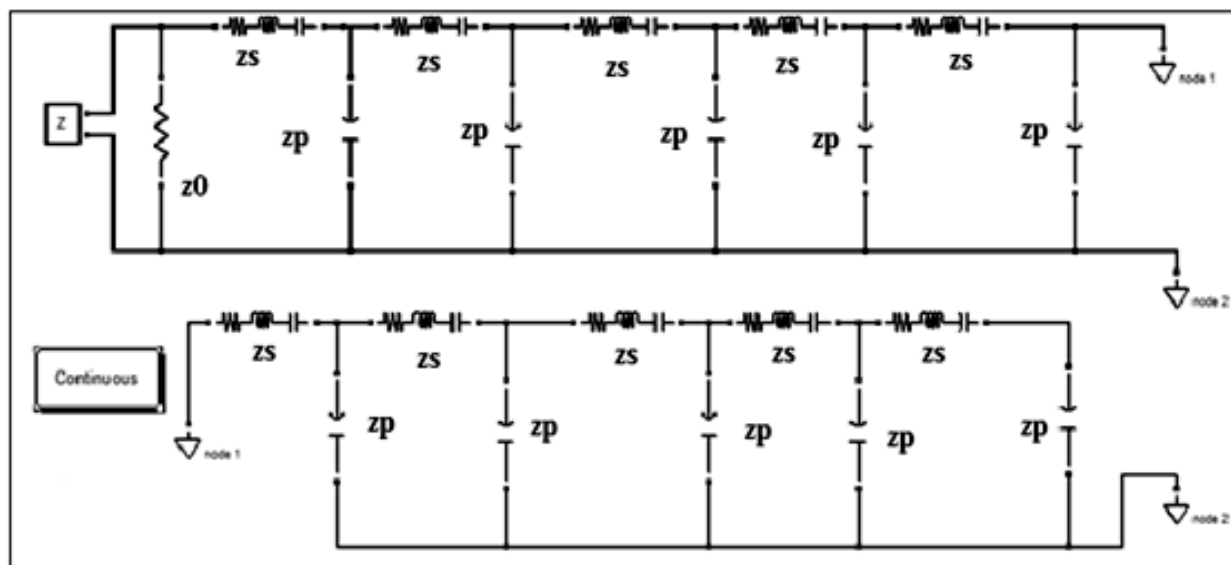


Рис. 6

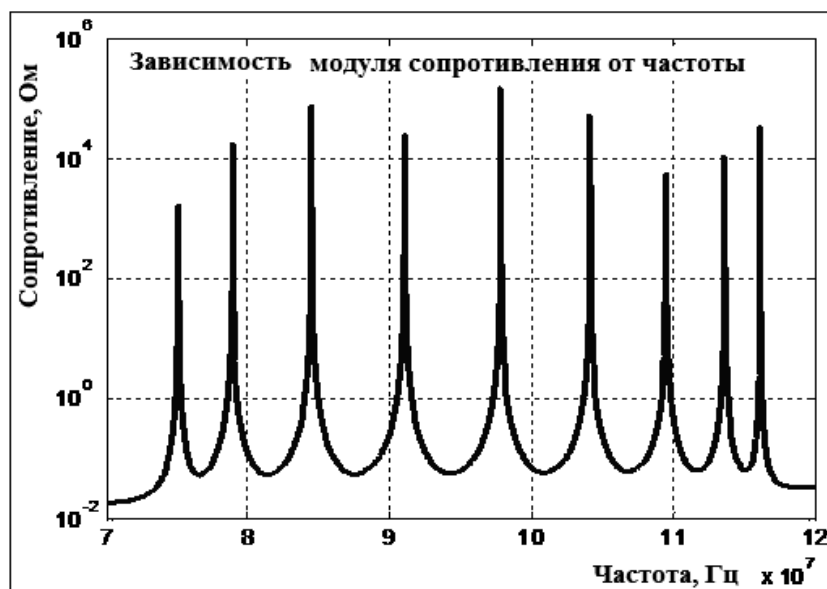


Рис. 7

Анализ проводился в пакете MATLAB, SIMULINK POWER SYSTEMS.

В выражении (7) eZ-операторное изображение напряжения нагрузки при ступенчатом сигнале на входе с амплитудой 300 В.

eZ:= =

$$1.588 \cdot 10^{20} \cdot (6.588 \cdot 10^{85} \cdot p^{16} + 3.060 \cdot 10^{108} \cdot p^{14} + 1.047 \cdot 10^{62} \cdot p^{18} + 1.086 \cdot 10^{196} \cdot p^4 + 3.787 \cdot 10^{208} \cdot p^2 + 7.937 \cdot 10^{150} \cdot p^{10} + 1.094 \cdot 10^{220} + 3.105 \cdot 10^{214} \cdot p + 1.781 \cdot 10^{130} \cdot p^{12} + 4.648 \cdot 10^{182} \cdot p^6 + 5.593 \cdot 10^{140} \cdot p^{11} + 2.859 \cdot 10^{189} \cdot p^5 + 3.053 \cdot 10^{119} \cdot p^4 +$$

$$13 + 4.375 \cdot 10^{175} \cdot p^7 + 3.297 \cdot 10^{160} \cdot p^9 + 1.845 \cdot 10^{97} \cdot p^{15} + 1.282 \cdot 10^{74} \cdot p^{17} + 2.590 \cdot 10^{202} \cdot p^3 + 2.057 \cdot 10^{168} \cdot p^8) / (3.175 \cdot 10^{15} \cdot p^{16} + 2.425 \cdot 10^{137} \cdot p^{14} + 5.768 \cdot 10^{92} \cdot p^{18} + 3.080 \cdot 10^{220} \cdot p^4 + 9.169 \cdot 10^{232} \cdot p^2 + 1.823 \cdot 10^{177} \cdot p^{10} + 7.072 \cdot 10^{238} \cdot p + 1.852 \cdot 10^{158} \cdot p^{12} + 8.146 \cdot 10^{68} \cdot p^{20} + 1.682 \cdot 10^{207} \cdot p^6 + 1.406 \cdot 10^{168} \cdot p^{11} + 9.021 \cdot 10^{21} \cdot p^5 + 9.429 \cdot 10^{147} \cdot p^{13} + 1.907 \cdot 10^{200} \cdot p^7 + 3.228 \cdot 10^{185} \cdot p^9 + 3.564 \cdot 10^{126} \cdot p^{15} + 1.053 \cdot 10^{81} \cdot p^{19} + 1.744 \cdot 10^{104} \cdot p^{17} + 6.739 \cdot 10^{226} \cdot p^3 + 2.364 \cdot 10^{244} + 1.188 \cdot 10^{193} \cdot p^8) \quad (7)$$

Выполнив обратное преобразование Лапласа, найдём реакцию цепи без корректирующей RC цепи (рис. 8 а).

Заметно превышение напряжения нагрузки над допустимым значением для многих полупроводниковых приборов.

При введении последовательной RC цепи Z_d с параметрами (8) параллельно нагрузке выходное напряжение не превышает допустимого значения (рис. 8, b).

$$C := 0.1e-7; R_3 := 9100; R := 0.1e6; \\ Z_d := (R_3 * p * C + 1) * R / (R_3 * p * C + 1 + R * p * C) \quad (8)$$

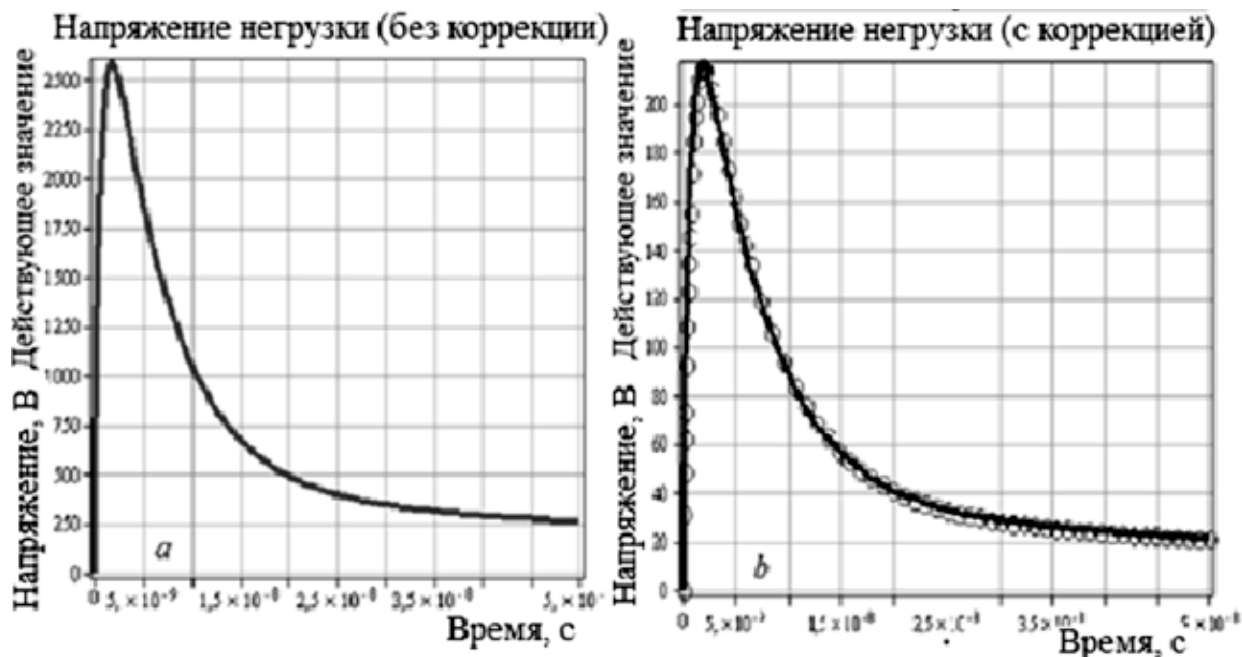


Рис. 8

На рис. 9 показана реакция цепи с коррекцией. Напряжение нагрузки при ступенчатом воздействии с амплитудой 300 В.

На рис. 7, 9 можно наблюдать много-частотный резонанс с количеством частот $M - 1$.

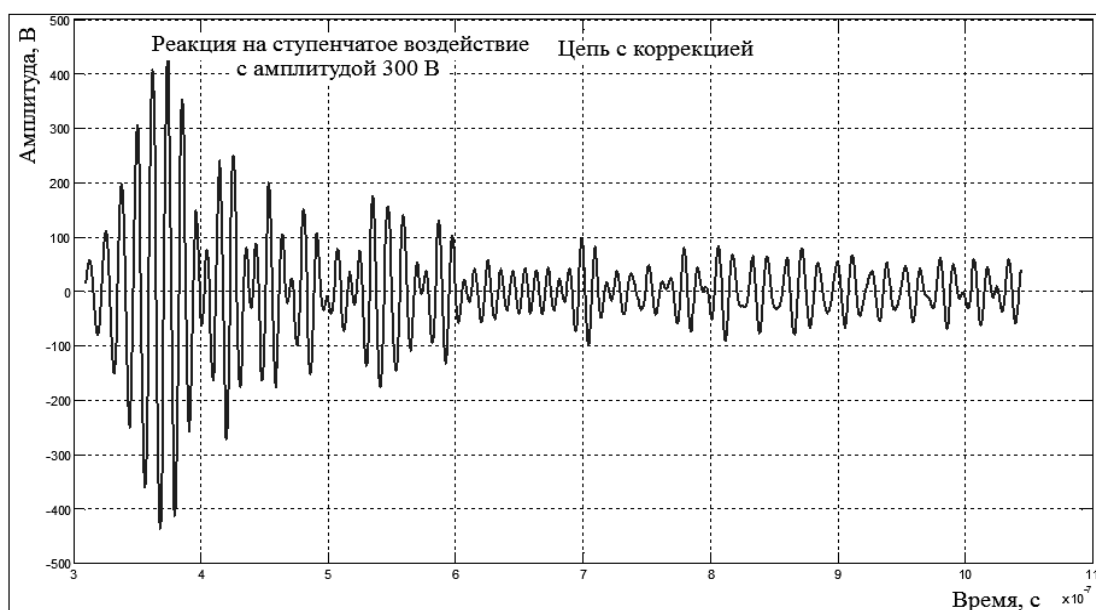


Рис. 9

Итак, использование понятия цепной схемы в виде совокупности дискретных элементов (ячеек) вместо термина «ёмкость катушки», применение метода лестничных дробей, по нашему мнению, более адекватно физике процессов в электромагнитном изделии.

При численном анализе может возникнуть необходимость работы с плохо обусловленными матрицами высокого порядка, например выражение (7).

Следует обратить внимание на контроль точности вычислений, применяя различные математические программные продукты, например, совместимые версии MAPLE, MATLAB и другие, обеспечивающие необходимую точность и возможность сравнения результатов.

Предлагаемая методика может содействовать при выборе оптимальной конфигурации и параметров цепей, предотвращающих аварийные режимы вентилей в составе преобразователя.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://coil32.ru/self-capacitance.html>.
2. Stray Capacitances of Single-Layer Solenoid Air-Core Inductors – Grandi, Kazimierczuk, Massarini and Reggiani 1999.
3. **Матханов П.Н.** Расчёт импульсных трансформаторов / П.Н. Матханов, Л.З. Голицын. М.: Энергия, 1980. 109 с.

4. **Цыпкин Я.З.** Теория линейных импульсных систем / Я.З. Цыпкин. М.: Физматгиз, 1963. 968 с.
5. **Атабеков Г.И.** Основы теории цепей / Г.И. Атабеков. М.: Энергия, 1969. 422 с.
6. Защита полупроводниковых преобразователей. <http://lektsii.com/2-404.html>; https://raschet.info/view_post.php?id=55.

Кошелев Пётр Александрович – доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

Парамонов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

Pyotr A. Koshelev – Dr.Sc., Professor, Saint Petersburg State Electrotechnical University “LETI”

Sergei V. Paramonov – PhD, Associate Professor Saint Petersburg State Electrotechnical University “LETI”

Статья поступила в редакцию 25.05.18, принята к опубликованию 20.06.18

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

УДК 621.372.8

К РАСЧЕТУ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕДАЧИ ШЛЕЙФОВЫХ РАЗВЕТВЛЕНИЙ СВЧ УСТРОЙСТВА НА СВЯЗАННЫХ ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ И П-ВОЛНОВОДЕ С ВЫСТУПАМИ НА РЕБРЕ

А.А. Скворцов, Е.А. Торгашов

CALCULATION OF THE TRANSFER RATIO OF THE BRANCH-LINE JUNCTIONS IN MICROWAVE DEVICES TO THE FIXED RECTANGULAR WAVEGUIDES AND P-WAVEGUIDES WITH PROTRUSIONS ON THE EDGES

A.A. Skvortsov, E.A. Torgashov

Рассмотрена методика расчета коэффициентов передачи шлейфовых разветвлений СВЧ устройства, первичный канал которого выполнен на прямоугольном волноводе, а вторичный – на П-волноводе с выступами на ребре, со связью каналов по широкой стенке через прямоугольные волноводы.

Ключевые слова: коэффициент передачи, СВЧ устройство, шлейфовое разветвление, прямоугольный волновод, П-волновод с выступами на ребре, критическая длина, основная волна, эквивалентная схема

В настоящее время одной из актуальных задач, решаемых в ряде технологических процессов, использующих взаимодействие диэлектрических материалов с электромагнитными волнами сверхвысоких частот, является разработка устройств, обеспечивающих равномерное тепловыделение в объеме обрабатываемого изделия. Одним из путей решения задачи является применение СВЧ устройства на связанных по широкой стенке посредством шлейфовых разветвлений прямоугольном волноводе (ПрВ) и П-волноводе с выступами на ребре (ПВВР), обеспечивающего равномерное

The article presents the method for calculating the transfer ratio of the branch-line junctions in microwave devices with the primary channel provided on the rectangular waveguide, while the secondary channel provided on the P-channel with protrusions on the edges, and the channel network provided over the wide wall through rectangular waveguides.

Keywords: transfer ratio, microwave device, branch-line junction, rectangular waveguide, P-waveguide with protrusion on the edges, critical length, principal wave, analogue circuit

распределение электрической составляющей поля основной волны как в поперечном сечении обрабатываемого материала, так и по его длине (рис. 1) [1].

Как показано в работе [2], зависимость коэффициента передачи одного шлейфого разветвления (волновода связи) в диапазоне частот аналогична передаточной характеристике СВЧ устройства на связанных волноводах. Поэтому анализ диапазонных свойств коэффициента передачи одного шлейфого разветвления позволяет однозначно судить о поведении коэффициента передачи рассматриваемого СВЧ устройства в целом.

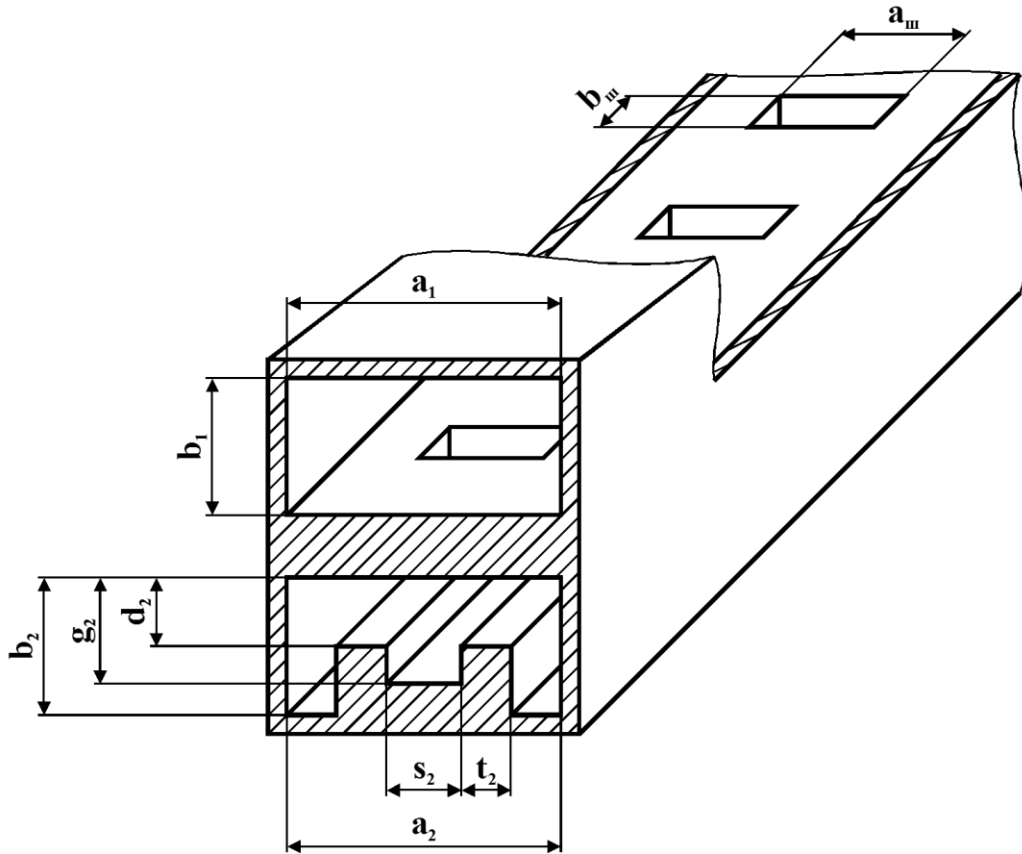


Рис. 1. СВЧ устройство на связанных по широкой стенке посредством шлейфов прямоугольного поперечного сечения ПрВ и ПВВР

Рассмотрим особенности расчета коэффициентов передачи шлейфовых разветвлений СВЧ устройства, первичный (основной) канал которого выполнен на ПрВ, а вторичный (вспомогательный) – на ПВВР, со связью каналов по широкой стенке через ПрВ. Полагая, что широкие стенки шлейфов перпендикулярны продольным осям основного и вспомогательного каналов СВЧ устройства, а их центры не смещены относительно средней линии связываемых волноводов, будем считать справедливым условие равенства тангенциальных составляющих магнитного поля основных волн

вторичного волновода и волновода связи [2]:

$$|H_{x2}| = |H_{xu}|, \quad (1)$$

где H_{x2} – поперечная составляющая магнитного поля основной волны, распространяющейся во вторичном канале; H_{xu} – поперечная составляющая магнитного поля основной волны волновода связи.

Компонента $E_{y2}(x)$ основной волны ПВВР, образующего вторичный канал СВЧ устройства, определяется выражением

$$E_{y2}(x) = \begin{cases} E_{0y2} \cos(\chi_{c12} x) & \text{при } 0 < x < \frac{s_2}{2}; \\ \frac{E_{0y2} g_2 \cos(\chi_{c12} s_2/2) \sin(\chi_{c12} (a_2/2 - x))}{d_2 \sin(\chi_{c12} (a_2 - s_2)/2)} & \text{при } \frac{s_2}{2} < x < \frac{s_2}{2} + t_2; \\ \frac{E_{0y2} g_2 \cos(\chi_{c12} s_2/2) \sin(\chi_{c12} (a_2/2 - x))}{b_2 \sin(\chi_{c12} (a_2 - s_2)/2)} & \text{при } \frac{s_2}{2} + t_2 < x < \frac{a_2}{2}, \end{cases} \quad (2)$$

где E_{0y2} – значение $E_{y2}(0)$; $\chi_{c12} = 2\pi/\lambda_{c12}$ и λ_{c12} – критические волновое число и длина основной волны ПВВР.

Критическую длину основной волны ПВВР можно определить, исходя из замены анализируемой линии передачи (ЛП) эквива-

лентной схемой из сосредоточенных индуктивностей и емкостей (рис. 2), по формуле [3]

$$\lambda_{c12} = 2\pi\sqrt{LC}, \quad (3)$$

где L и C – погонные индуктивность и емкость эквивалентного колебательного контура.

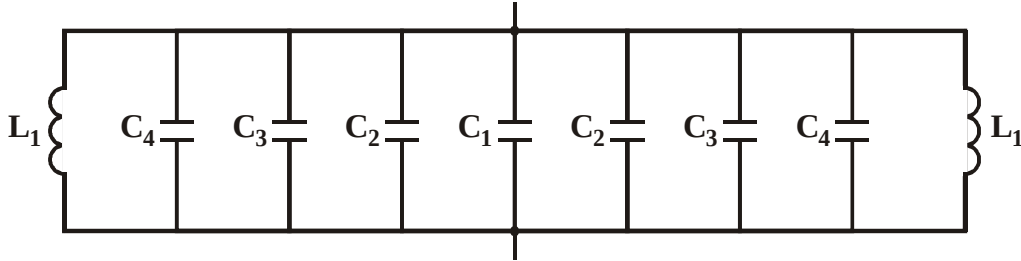


Рис. 2. Эквивалентная схема для расчета критической длины основной волны ПВВР

Погонная индуктивность может быть найдена из соотношения

$$L = \frac{L_1}{2}, \quad (4)$$

где

$$L_1 = \frac{\mu_2\mu_0 b_2 (a_2 - 2t_2 - s_2)}{2} \quad (5)$$

– погонная индуктивность боковой секции ПВВР; μ_0 – магнитная постоянная; μ_2 – относительная магнитная проницаемость материала, заполняющего ПВВР.

Погонная емкость в этом случае определяется выражением

$$C = C_1 + 2(C_2 + C_3 + C_4), \quad (6)$$

где C_1 и C_3 – погонные электростатические емкости; C_2 и C_4 – погонные краевые емкости.

Погонные электростатические емкости C_1 и C_3 можно рассчитать по формуле плоского конденсатора из соотношений:

$$C_1 = \frac{\epsilon_2\epsilon_0 s_2}{g_2}; \quad (7)$$

$$C_3 = \frac{\epsilon_2\epsilon_0 t_2}{d_2}, \quad (8)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная; ϵ_2 – относительная диэлектрическая проницаемость материала, заполняющего ПВВР.

Погонные краевые емкости C_2 и C_4 вычисляются по формулам

$$C_2(\vartheta_1) = \frac{\epsilon_2\epsilon_0}{\pi} \left[\frac{1+\vartheta_1^2}{\vartheta_1} \operatorname{Arch} \left(\frac{1+\vartheta_1^2}{1-\vartheta_1^2} \right) - 2 \ln \left(\frac{4\vartheta_1}{1-\vartheta_1^2} \right) \right]; \quad (9)$$

$$C_4(\vartheta_2) = \frac{\epsilon_2\epsilon_0}{\pi} \left[\frac{1+\vartheta_2^2}{\vartheta_2} \operatorname{Arch} \left(\frac{1+\vartheta_2^2}{1-\vartheta_2^2} \right) - 2 \ln \left(\frac{4\vartheta_2}{1-\vartheta_2^2} \right) \right], \quad (10)$$

где $\vartheta_1 = d_2/g_2$; $\vartheta = d_2/b_2$.

Поперечная составляющая $H_{x2}(x)$ основной волны ПВВР может быть определена из выражения

$$H_{x2}(x) = -\frac{E_{y2}(x)}{Z_{c2}} \cos \theta_2, \quad (11)$$

где $Z_{c2} = \sqrt{\mu_2\mu_0/\epsilon_2\epsilon_0}$ – характеристическое сопротивление материала, заполняющего ПВВР; $\cos \theta_2 = \left[1 - (\lambda/\lambda_{c12})^2 \right]^{1/2}$; λ – рабочая длина волны.

После подстановки выражения (2) в формулу (11) окончательно получим

$$H_{x2}(x) = - \begin{cases} \frac{E_{0y2} \cos(\chi_{c12} x) \cos \theta_2}{Z_{c2}} & \text{при } 0 < x < \frac{s_2}{2}; \\ \frac{E_{0y2} g_2 \cos(\chi_{c12} s_2/2) \sin(\chi_{c12} (a_2/2 - x)) \cos \theta_2}{Z_{c2} d_2 \sin(\chi_{c12} (a_2 - s_2)/2)} & \text{при } \frac{s_2}{2} < x < \frac{s_2}{2} + t_2; \\ \frac{E_{0y2} g_2 \cos(\chi_{c12} s_2/2) \sin(\chi_{c12} (a_2/2 - x)) \cos \theta_2}{b_2 Z_{c2} \sin(\chi_{c12} (a_2 - s_2)/2)} & \text{при } \frac{s_2}{2} + t_2 < x < \frac{a_2}{2}. \end{cases} \quad (12)$$

Постоянная интегрирования E_{0y2} может быть рассчитана через поток мощности во вторичном канале СВЧ-устройства по формуле

$$P_2 = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_s [\vec{E}_2 \vec{H}_2^*] d\vec{S} = P_{02} + P_{k2}, \quad (13)$$

где $\vec{E}_2$ и $\vec{H}_2^*$ – комплексная и комплексно-сопряженная амплитуды векторов

напряженности электрического и магнитного полей во вторичном волноводе; S – площадь поперечного сечения вторичного волновода; P_{02} и P_{k2} – составляющие потока мощности, создаваемые основным и краевыми полями.

Значение составляющей потока мощности P_{02} , создаваемой основной волной, может быть определено из соотношения

$$P_{02} = -2 \left\{ \int_0^{s_2/2} \int_0^{g_2} E_{y2} H_{x2} dx dy + \int_{s_2/2}^{s_2/2+t_2} \int_0^{d_2} E_{y2} H_{x2} dx dy + \int_{s_2/2+t_2}^{a_2/2} \int_0^{b_2} E_{y2} H_{x2} dx dy \right\}. \quad (14)$$

С использованием выражений (2) и (12) соотношение (14) можно представить в следующем виде:

$$P_{02} = \frac{2E_{0y2}^2 \cos \theta_2}{Z_{c2}} \left\{ \int_0^{s_2/2} \int_0^{g_2} \cos^2(\chi_{c12} x) dx dy + \frac{g_2^2}{d_2^2} \frac{\cos^2(\chi_{c12} s_2/2)}{\sin^2(\chi_{c12} (a_2 - s_2)/2)} \int_{s_2/2}^{s_2/2+t_2} \int_0^{d_2} \sin^2(\chi_{c12} (a_2/2 - x)) dx dy + \frac{g_2^2}{b_2^2} \frac{\cos^2(\chi_{c12} s_2/2)}{\sin^2(\chi_{c12} (a_2 - s_2)/2)} \int_{s_2/2+t_2}^{a_2/2} \int_0^{b_2} \sin^2(\chi_{c12} (a_2/2 - x)) dx dy \right\}. \quad (15)$$

Проведя интегрирование по поперечному сечению ПВВР, имеем

$$P_{02} = \frac{g_2 E_{0y}^2 \cos \theta_2}{2Z_{c2}} \left\{ s_2 + \frac{\sin(\chi_{c12} s_2)}{\chi_{c12}} + \frac{g_2 \cos^2(\chi_{c12} s_2/2)}{b_2 \sin^2(\chi_{c12} (a_2 - s_2)/2)} \times \left[a_2 - s_2 - \frac{\sin(\chi_{c12} (a_2 - s_2))}{\chi_{c12}} + \left(1 - \frac{d_2}{b_2} \right) \left(\frac{\sin(\chi_{c12} (a_2 - s_2 - 2t_2))}{\chi_{c12}} + 2t_2 \right) \right] \right\}. \quad (16)$$

Выражение для расчета составляющей потока мощности во вторичном канале СВЧ-устройства, обусловленной краевыми полями, можно записать следующим образом:

$$P_{k2} = \frac{2g_2^2 E_{0y2}^2 \cos^2(\chi_{c1} s_2/2) \cos \theta_2}{\varepsilon_2 Z_{c2}} \left(C_2 + \frac{C_4 \sin^2(\chi_{c12} (a_2 - s_2 - 2t_2)/2)}{\sin^2(\chi_{c12} (a_2 - s_2)/2)} \right), \quad (17)$$

откуда

$$E_{0y2} = 2 \left(\frac{P_2 Z_{c2}}{\cos \theta_2} \Phi_2 \right)^{1/2}, \quad (18)$$

где

$$\begin{aligned} \Phi_2 = & \left\{ g_2 \left[s_2 + \frac{\sin(\chi_{c12} s_2)}{\chi_{c12}} + \frac{g_2 \cos^2(\chi_{c12} s_2/2)}{b_2 \sin^2(\chi_{c12} (a_2 - s_2)/2)} \times \right. \right. \\ & \times \left[a_2 - s_2 + \frac{\sin(\chi_{c12} (a_2 - s_2))}{\chi_{c12}} + \left(1 - \frac{d_2}{b_2} \right) \left(2t_2 + \frac{\sin(\chi_{c12} (a_2 - s_2 - 2t_2))}{\chi_{c12}} \right) \right] + \\ & \left. \left. + \frac{g_2 \cos^2(\chi_{c12} s_2/2)}{\varepsilon_2} \left(C_2 + \frac{C_4 \sin^2(\chi_{c12} (a_2 - s_2 - 2t_2)/2)}{\sin^2(\chi_{c12} (a_2 - s_2)/2)} \right) \right] \right\}^{-1} = (g_2 T_2)^{-1}. \end{aligned} \quad (19)$$

С использованием известного из работы [2] выражения для расчета поперечной составляющей магнитного поля ПрВ H_{xu} представим граничные условия в центре шлейфа (1) в виде

$$2 \left(\frac{P_2 \cos \theta_2}{Z_{c2}} \Phi_2 \right)^{1/2} = 2 \left(\frac{P_u \cos \theta_u}{a_u b_u Z_{cu}} \right)^{1/2}, \quad (20)$$

где $Z_{cu} = \sqrt{\mu_u \mu_0 / \varepsilon_u \varepsilon_0}$, ε_u и μ_u – характеристическое сопротивление и относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости материала, заполняющего волновод связи; $\cos \theta_u = \left[1 - (\lambda / \lambda_{c1u})^2 \right]^{1/2}$; λ_{c1u} – критическая длина основной волны волновода связи.

Тогда

$$\left(\frac{P_u}{P_2} \right)^{1/2} = \left(\frac{a_u b_u Z_{cu} \cos \theta_2}{g_2 T_2 Z_{c2} \cos \theta_u} \right)^{1/2}. \quad (21)$$

$$\begin{aligned} K_{u\min} = & \left(\frac{P_u}{P_1} \right)^{1/2} \left(\frac{P_u}{P_2} \right)^{1/2} = \frac{1}{2\sqrt{k^*}} \frac{a_u b_u Z_{cu}}{\cos \theta_u} \left(\frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{a_1 b_1 g_2 T_2 Z_{c1} Z_{c2}} \right)^{1/2} = \\ = & \frac{1}{2\sqrt{k^*}} \frac{a_u b_u \lambda_{vu} Z_{cu}}{(a_1 b_1 g_2 T_2 \lambda_{v1} \lambda_{v2} Z_{c1} Z_{c2})^{1/2}}, \end{aligned} \quad (23)$$

где $\sqrt{k^*} \approx 1$; λ_{vu} , λ_{v1} и λ_{v2} – длины основных волн в волноводе связи, первичном и вторичном каналах.

Таким образом, приведенные в настоящей работе выражения могут быть использованы для расчета минимального коэффициента передачи СВЧ устройства,

Аналогичное соотношение можно получить и для коэффициента передачи из первичного канала в волновод связи:

$$\left(\frac{P_u}{P_1} \right)^{1/2} = \left(\frac{a_u b_u Z_{cu} \cos \theta_1}{a_1 b_1 Z_{c1} \cos \theta_u} \right)^{1/2}, \quad (22)$$

где $Z_{c1} = \sqrt{\mu_1 \mu_0 / \varepsilon_1 \varepsilon_0}$, ε_1 и μ_1 – характеристическое сопротивление и относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости материала, заполняющего первичный канал; $\cos \theta_1 = \left[1 - (\lambda / \lambda_{c1})^2 \right]^{1/2}$; λ_{c1} – критическая длина основной волны первичного канала.

Учитывая, что минимальный коэффициент передачи шлейфового разветвления можно выразить через коэффициенты передачи соответствующих Т-соединений [2], получаем

в котором первичный канал выполнен на ПрВ, а вторичный – на ПВВР, со связью через ПрВ, широкая стенка которого перпендикулярна средним линиям широких стенок связываемых ЛП. Необходимо отметить, что выше рассмотрен наиболее простой случай связи каналов СВЧ

устройства по широкой стенке через ПрВ. Для уменьшения перепада частотной характеристики переходного ослабления СВЧ устройства на связанных ПрВ и ПВВР необходимо использовать шлейфы

сложных сечений, которые по сравнению со связываемыми волноводами имеют не только большую критическую длину основной волны, но и больший диапазон одноволновой работы [4, 5].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Скворцов А.А.** Применение П-волновода с выступами на ребре для равномерного нагрева диэлектрических материалов / А.А. Скворцов, Е.А. Торгашов, М.А. Соловьев // Проблемы управления, обработки и передачи информации: III Междунар. науч. конф. Саратов: ИД «Райт-Экспо», 2013. Т. 3. С. 163-169.

2. **Сосунов В.А.** Шлейфовые волноводные разветвления и устройства на их основе / В.А. Сосунов. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1995. 104 с.

3. **Скворцов А.А.** Квазистационарный расчет электродинамических параметров П- и Н-волноводов с выступами на ребрах /

А.А. Скворцов // Радиотехника. 2016. № 7. С. 75-81.

4. **Скворцов А.А.** Приближенно-аналитические соотношения для расчета передаточных характеристик шлейфовых разветвлений СВЧ устройств на связанных прямоугольных волноводах / А.А. Скворцов, А.А. Евсейкин // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 10. С. 39-45.

5. **Скворцов А.А.** Особенности приближенно-аналитического расчета коэффициентов передачи шлейфовых разветвлений СВЧ-устройств на двугребневом волноводе с элементами связи сложных сечений / А.А. Скворцов, Г.И. Сидоров // Вестник СГТУ. 2010. № 1. С. 168-174.

Скворцов Алексей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Торгашов Евгений Алексеевич – инженер ООО НПП «НИКА-СВЧ»

Aleksei A. Skvortsov – PhD, Associate Professor Department of Radioelectronics and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Evgeny A. Torgashov – Engineer, ООО NPP NIKA-SVCH

Статья поступила в редакцию 23.05.18, принята к опубликованию 20.06.18

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621-039-419; 620.22-419; 537.868

ВЛИЯНИЕ СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ ОТВЕРЖДЕННЫХ АРМИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ ВОЛОКНАМИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

И.В. Злобина, Н.В. Бекренев

IMPACT OF THE MICROWAVE ELECTROMAGNETIC FIELD ON THE MICROSTRUCTURE OF HARDENED POLYMER COMPOSITES REINFORCED BY CARBON FIBERS

I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev

Приведены результаты исследования методами электронной микроскопии микроструктуры полимерных композиционных материалов в области матрицы, армирующих волокон и межфазной зоны. Установлено повышение плотности структуры матрицы и уменьшение доли микротрещин и полостей при одновременном уменьшении размеров отдельных агломератов после их взаимодействия с СВЧ электромагнитным полем частотой 2450 МГц. Констатируется увеличение контактных точек в межфазной зоне и формирование структурированной поверхности углеродных волокон, что также способствует улучшению их адгезионного взаимодействия с матрицей. Данное изменение микроструктуры может быть предложено в качестве одного из механизмов повышения прочности отвержденных полимерных композиционных материалов при воздействии СВЧ электромагнитного поля.

Ключевые слова: микроструктура, СВЧ электромагнитное поле, матрица, армирующее волокно, межфазная зона, поверхность, плотность, агломераты

Анализ научно-технической литературы, материалов конференций и выставок

The article presents the results of research on the microstructure of polymer composites in the field of the matrix, reinforced fibers and the inter-phase zone conducted by the methods of electronic microscopy. WE established an increase in the density of the matrix structure and reduction in the share of the microcracks and cavities at simultaneous reduction of the size of separate agglomerates after their interaction with the microwave electromagnetic field with the frequency at 2450 MHz. We found an increase in contact points within the inter-phase zone, and formation of the structured surface of carbon fibers, which improves their adhesive interaction with the matrix. We admit that this change in the microstructure can be used as one of mechanisms for increasing durability of the hardened polymer composite materials under the influence of the microwave electromagnetic field.

Keywords: microstructure, the microwave electromagnetic field, matrix, reinforced fiber, an inter-phase zone, surface, density, agglomerates

свидетельствует об интенсивном развитии производства полимерных композицион-

ных материалов (ПКМ) на основе углеродных волокон и стеклотканей и их широком применении в авиационной, автомобильной, судостроительной промышленности, ракетостроении и космической технике. Без опережающего развития технологий ПКМ невозможно создание перспективных технических систем. В перспективе наиболее высокие темпы роста будут характерны для термопластичных композитов на основе углепластиков, что повлечет за собой также реорганизацию технологического обеспечения производства изделий [1, 2]. Однако вследствие определенного закона распределения компонентов, условий формирования и отверждения композиций, полученные материалы и изделия из них обладают явно выраженной анизотропией свойств, что вызывает необходимость дополнительного усиления конструкции в некоторых опасных участках, что приводит к увеличению веса. Данный факт весьма нежелателен для изделий авиационно-космической техники, особенно для высокоманевренных и скоростных объектов. В то же время перспективные авиационные и ракетные комплексы будут высокоманевренными, использоваться в условиях гиперзвуковых скоростей в атмосфере и ближнем космосе, что выдвигает повышенные требования к механической и термической прочности их конструктивных элементов, имеющих сложные формы, сильно влияющие на распределение опасных механических и температурных напряжений.

Для локального управляющего воздействия на структуру и прочностные свойства трехмерного или двумерного объекта из неметаллических материалов в качестве наиболее эффективного метода представляется применение СВЧ электромагнитного поля. Проведенный анализ материалов отечественных и зарубежных научных публикаций [3-5] показывает, что наибольшее внимание в развитии исследований в области сверхвысокочастотной обработки материалов уделяется поиску принципиально новых решений для применения микровол-

новых технологий с целью замещения существующих технологий термообработки. Вопросы нагрева материалов в электромагнитном поле обсуждаются на международных симпозиумах, наиболее представительным среди которых можно считать конгресс по применению радиочастоты и микроволн, проводимый раз в два года, в котором участвуют специалисты таких стран, как США, Великобритания, Германия, Франция, Россия, Бразилия, Румыния, Турция, Мексика, Чехия, Польша. На конгрессах по применению радиочастот и микроволн рассматривается большой спектр различных направлений развития и применения электромагнитных технологий различного частотного диапазона: энергетическая эффективность технологий; термообработка керамики, полимеров, стекла, минералов и других диэлектрических материалов; обработка отходов различных производств; полупроводники и микроэлектронное производство; методы измерения диэлектрических свойств материалов; моделирование и взаимодействие материалов с энергией электромагнитного поля сверхвысоких частот и т.д. Отмечается, что применение волновых технологий позволяет значительно улучшить качественные показатели при производстве и обработке многих видов материалов.

Исследованиями отечественных и зарубежных ученых [3-5], установлены закономерности модифицирующего влияния СВЧ электромагнитного поля на различные диэлектрические материалы, в том числе с проявлением как диэлектрического нагрева, так и нетепловых эффектов. Достигнуты определенные результаты в повышении прочностных свойств композиционных неметаллических материалов.

Нами выполнены экспериментальные исследования [6-9] влияния СВЧ электромагнитного поля на прочность пултрузионного карбона и углепластика с квазиизотропной структурой. Установлено, что на оптимальных режимах воздействия, не вызывающих нагрев объекта обработки выше 39-40°C, обеспечиваются следующие положительные эффекты. Напряжения изгиба

возрастают на 11-16%, напряжения среза – на 13-21%. При испытаниях на межслоевой сдвиг обработанные образцы выдерживают напряжения, большие на 14-15%. При этом обработка в СВЧ электромагнитном поле практически не влияет на напряжения при растяжении. Увеличение не превышает 2%, что находится в пределах погрешности измерений.

Очевидно, что механизмы указанного изменения прочностных характеристик могут проявляться через модифицирование структуры композиционного материала. Однако до настоящего времени мало внимания уделено изменению микроструктуры материалов в процессе СВЧ обработки после их окончательного отверждения, что не позволяет полностью описать механизм отмеченных выше эффектов.

Причины появления упрочняющих эффектов в окончательно сформированном композиционном материале при воздействии СВЧ электромагнитного поля могут быть выявлены на основе изучения микро- и наноструктуры образцов при помощи электронной микроскопии.

Целью исследований явилась оценка изменения характеристик микроструктуры отвержденных армированных углеродными волокнами композиционных материалов после их обработки в СВЧ электромагнитном поле.

Для обоснования полученных ранее результатов по упрочнению в СВЧ электромагнитном поле отвержденных композиционных материалов [6-8] нами выполнены исследования микроструктуры образцов при помощи электронной микроскопии. Исследованы образцы из отвержденного композита КМКУ-1.80.Э0,1, состоящего из матрицы на основе клеевого связующего ВК-51 и наполнителя - углеродной ленты ЭЛУР-П-А с объемной долей наполнителя 70-75%. Использовали образцы в виде балок сечением 5 x 10 мм и длиной 70 мм. Эксперименты проводили в специальной СВЧ установке «Жук-2-02» (ООО «Агро-ЭкоТех», г. Обнинск Калужской обл.) с излучающей антенной рупорного типа. Частота электромагнитного поля составляла

2450 МГц, мощность магнетрона – 1200 Вт. Обработку осуществляли на среднем уровне мощности при времени воздействия, обеспечивающем максимальный упрочняющий эффект [8]. Обработывали по 3 образца. Микроструктуру изучали при помощи электронного микроскопа MIRA II LMU (Tescan Ersay Holding, Чехия) в Лаборатории материалов специального назначения Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского.

На приведенных ниже микрофотографиях (рис. 1-6) при различном увеличении показаны три области образцов: матрица, волокно, межфазная зона. На микрофотографиях выделяли наиболее характерные области (фрагменты) и дополнительно увеличивали программными средствами компьютера.

Анализ микрофотографий позволяет сделать следующие выводы. При большом увеличении (от $\times 50000$ до $\times 75000$) отмечается большая округлость отдельных фрагментов микроструктуры контрольных образцов. На их поверхности заметны сфероидные образования, появившиеся, очевидно, в процессе термического отверждения матрицы при формировании композита. Обработанные образцы характеризуются угловатостью фрагментов матрицы и практическим отсутствием сфероидных образований. Их поверхность в целом более рельефна. Плотность микроструктуры при данном увеличении как контрольных, так и обработанных образцов примерно одинакова, что свидетельствует об одинаковой размерности микро- и нанопор и их концентрации (рис. 1).

При меньшем увеличении ($\times 25000$) начинают проявляться существенные различия в структуре матрицы. В контрольных образцах присутствуют значительные пустоты (мезопоры) размерами 2-5 мкм, трещины и полости. Агломераты связаны между собой в незначительном количестве точек. Их размеры составляют от 4×8 мкм до 2×3 мкм. Агломераты обработанных образцов имеют значительно меньшие размеры: 1×2 мкм и менее. Пор очень мало, и их размеры не превышают 1 мкм (рис. 2).

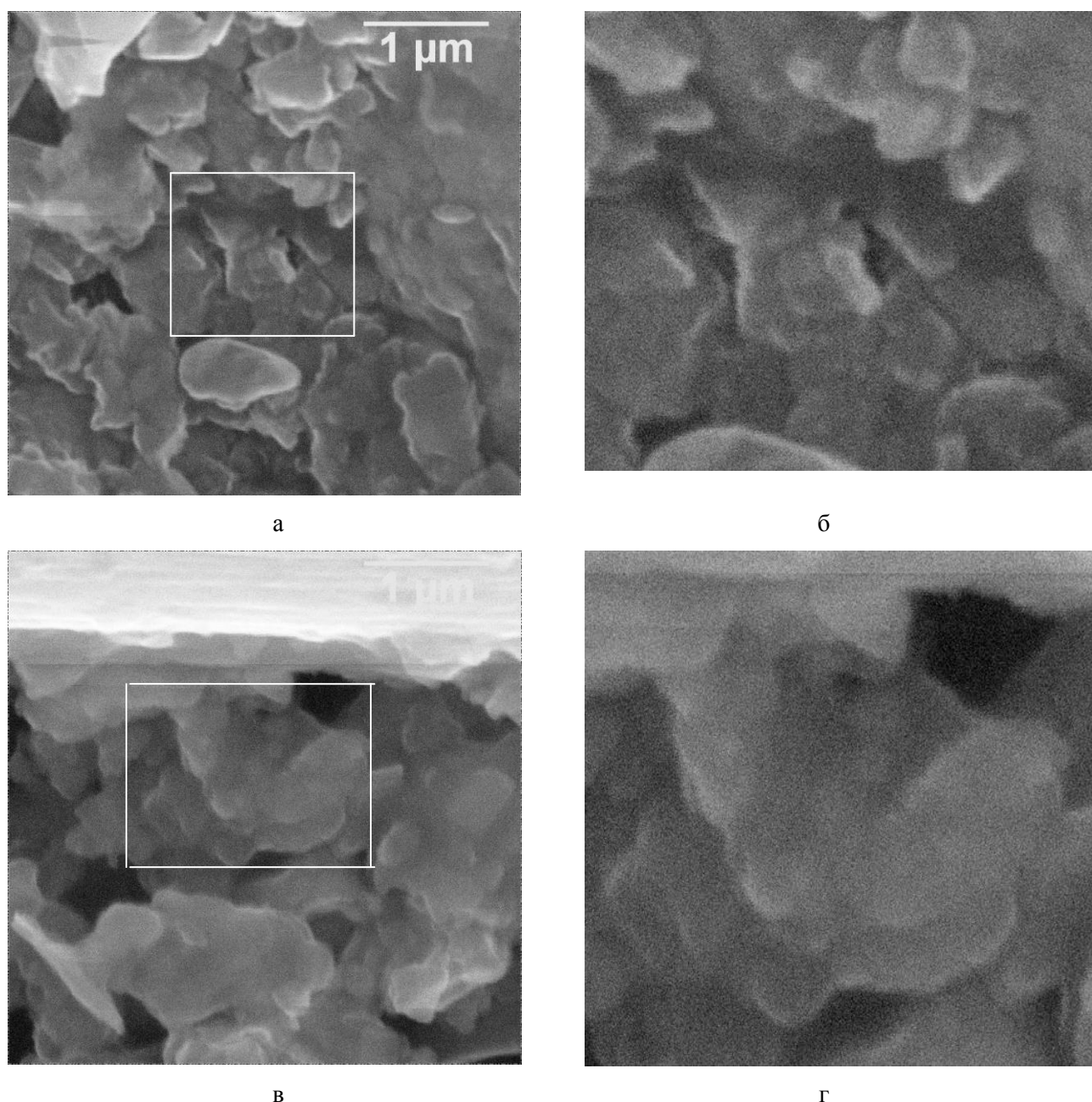
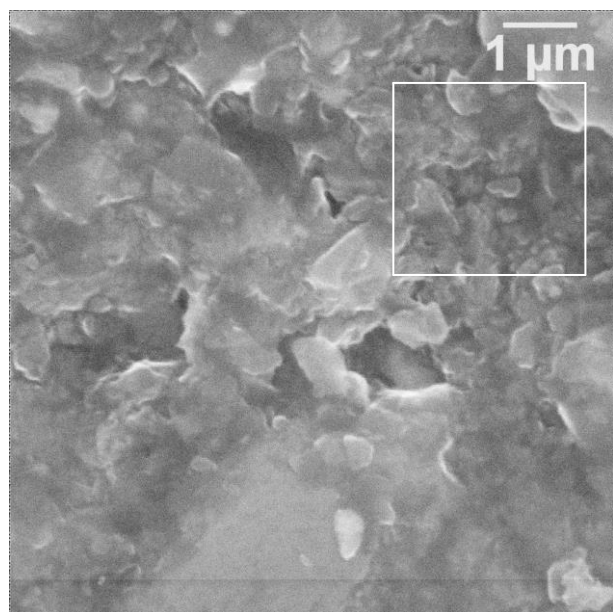


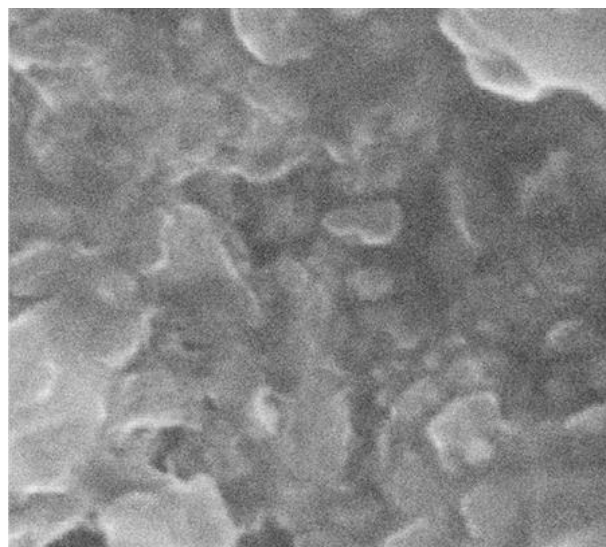
Рис. 1. Микроструктура матрицы обработанного (а, б) и контрольного (в, г) образцов при увеличении $\times 50000$

При данном увеличении становится возможным выявить отдельные углеродные волокна. Видно, что поверхность волокон образцов, прошедших обработку, претерпела значительные изменения (рис. 3). Если в контрольных образцах волокна имеют практически гладкую поверхность, то в обработанных их поверхность выглядит рифленой с продольными ребрами, идущими практически с равномерным шагом в 0,5 мкм. Высоту ребер можно оценить по

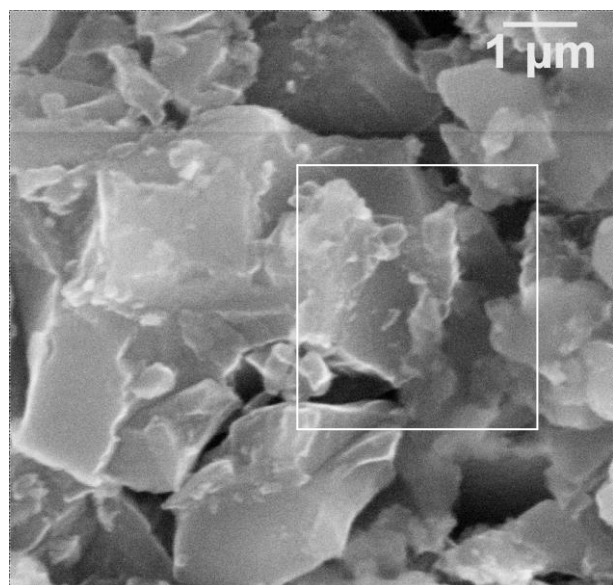
микрофотографии с учетом масштаба около 0,1 мкм. Видно, что волокна имеют больше областей адгезионного взаимодействия с матрицей. Также, по крайней мере, часть волокон имеет меньший диаметр, чем в контрольных образцах. Рифленая поверхность может способствовать улучшению их адгезионного взаимодействия с агрегатами матрицы, что увеличивает прочность материала при поперечных деформациях, в частности, межслоевом сдвиге.



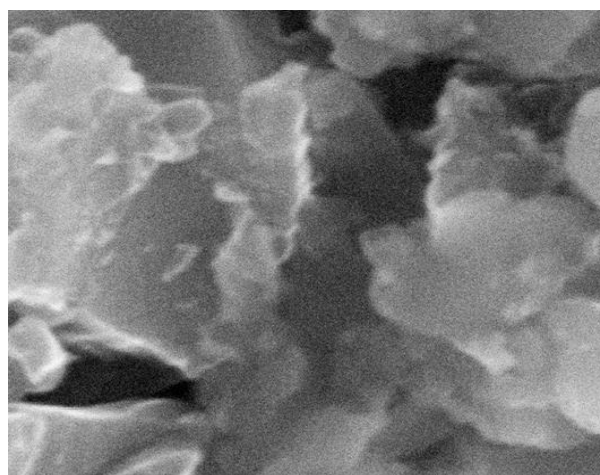
а



б



в



г

Рис. 2. Микроструктура матрицы обработанного (а, б) и контрольного (в, г) образцов при увеличении $\times 25000$

Причиной отмеченного изменения поверхности углеродных волокон может явиться выделение из них водородно-кислородных соединений при их колебаниях в СВЧ электромагнитном поле, протекание дегидратации, что приводит к своего рода «усадке» волокна с сохранением микрофибрилльной структуры, проявляющейся в виде ребер.

При меньшем увеличении ($\times 10000$) описанные особенности структуры мат-

рицы и волокон сохраняются. Однако становятся видимыми полностью более крупные элементы структуры, а именно скопления агломератов матрицы. В контрольных образцах выделяются макропоры сложной формы протяженностью 15-20 мкм. Присутствуют скопления агломератов размерами до 10 мкм, разделенные трещинами.

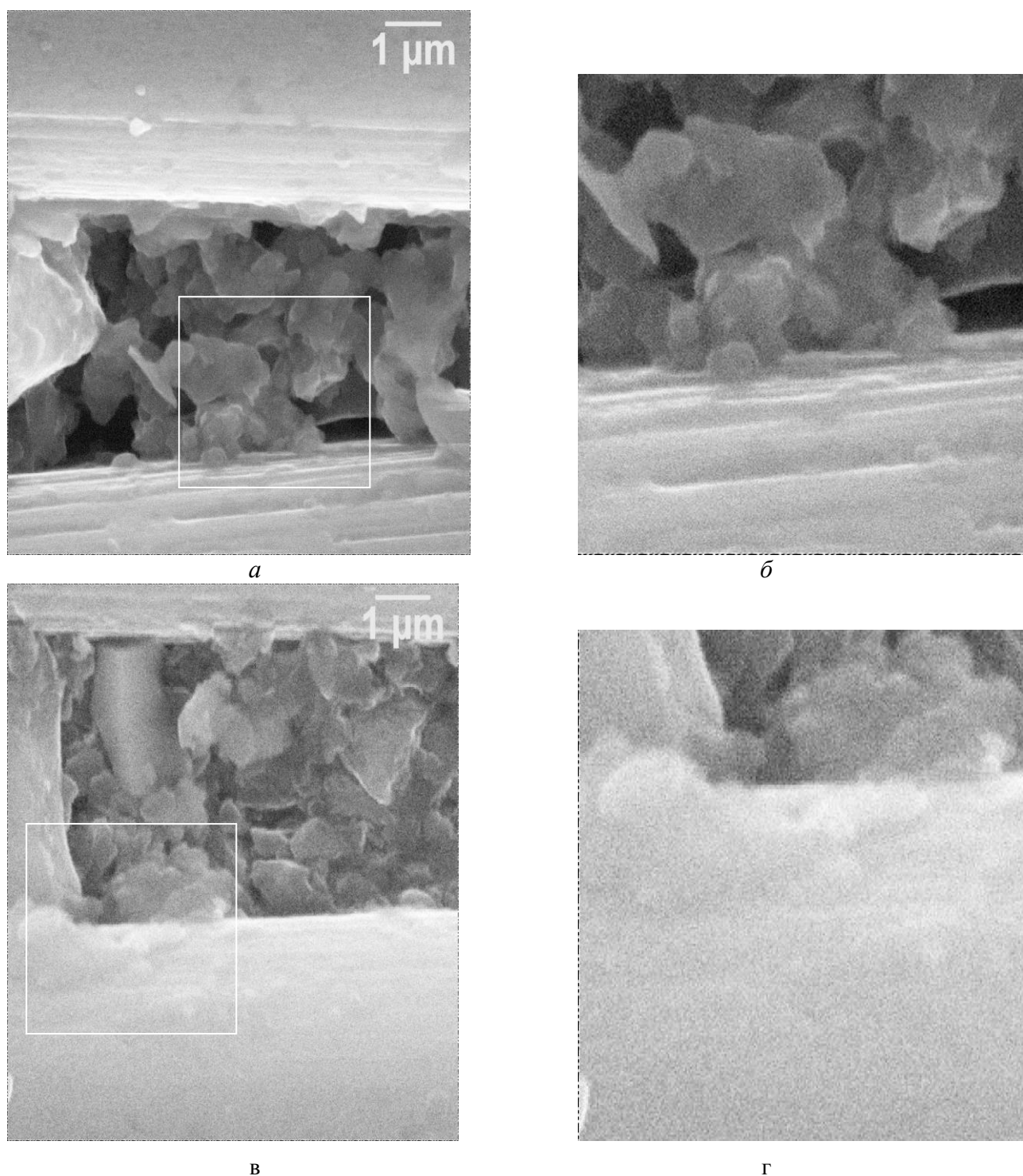


Рис. 3. Углеродное волокно обработанного (а, б) и контрольного (в, г) образцов при увеличении $\times 25000$

В обработанных образцах подобных крупных образований выявить не удастся. Микроструктура характеризуется высокой плотностью, образована агломератами, практически равномерно заполняющими поле зрения. Размеры агломератов при данном увеличении оцениваются в 2-3 мкм, что соответствует размерам, определяемым

при увеличении $\times 25000$. То есть скоплений агломератов практически не образуется в отличие от контрольного образца, что позволяет характеризовать структуру материала, как однородную. Пор мало и их размеры не превышают 2-3 мкм (рис. 4). На поверхности углеродных волокон обработанных образцов также заметны ребра (рис. 5).

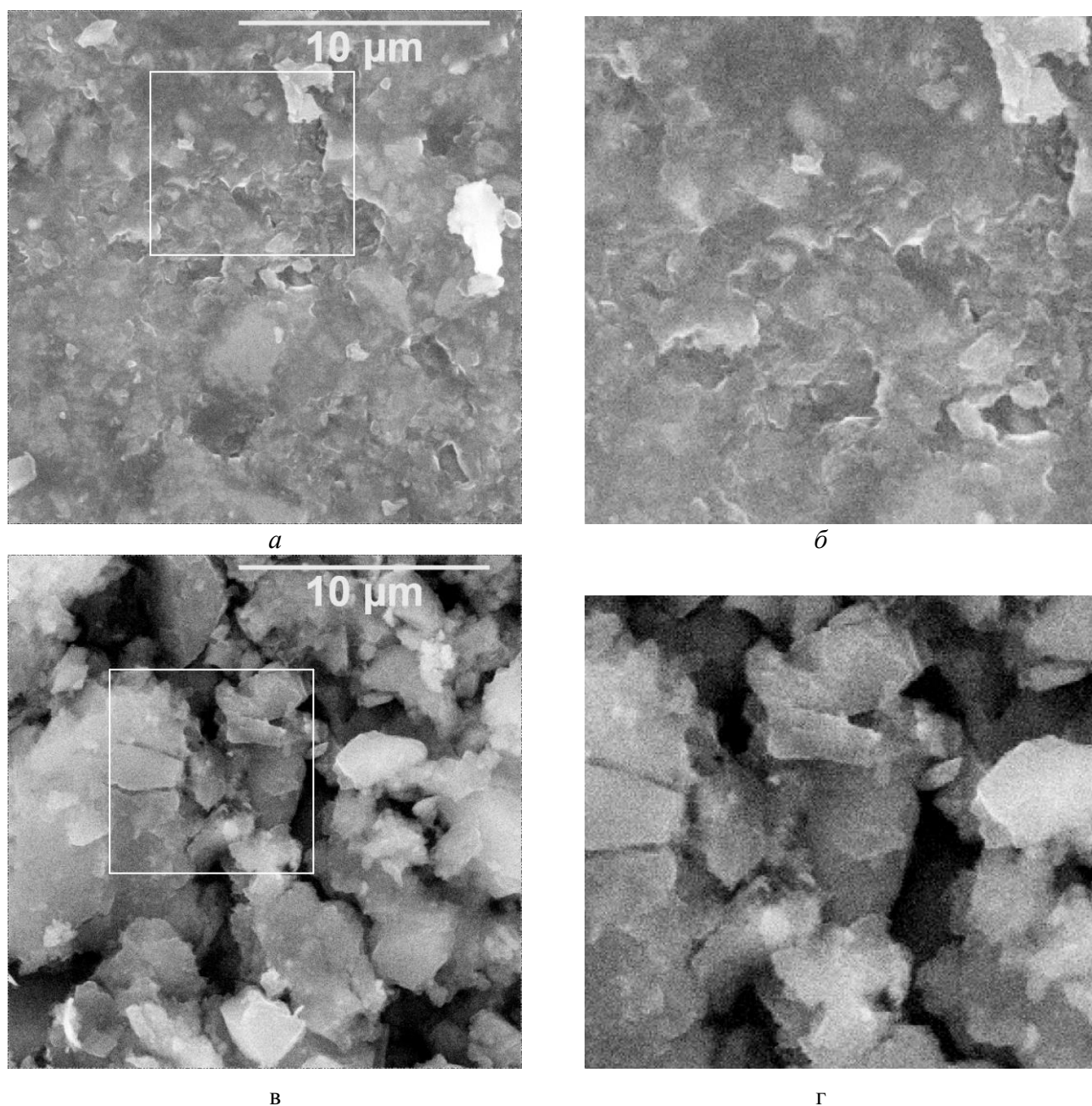
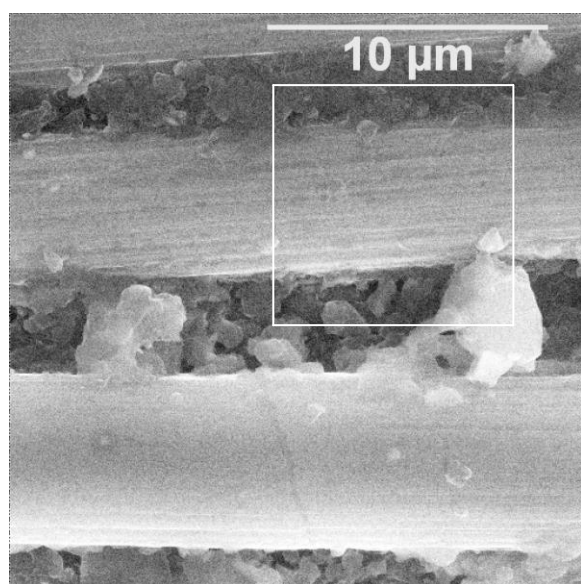


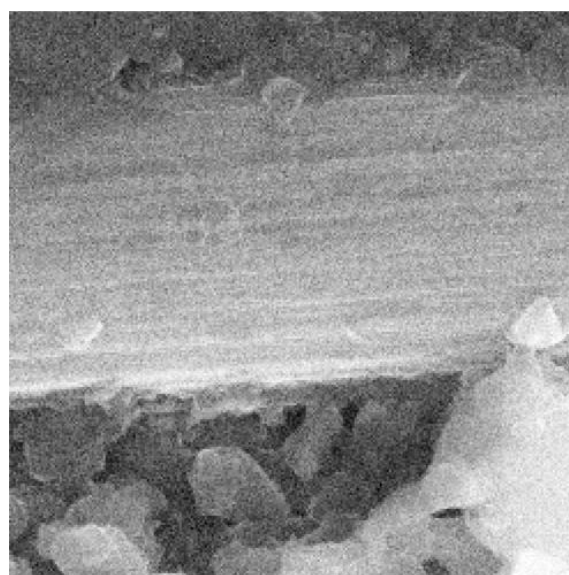
Рис. 4. Микроструктура матрицы обработанного (*а, б*) и контрольного (*в, г*) образцов при увеличении $\times 10000$

При увеличении $\times 5000$ хорошо заметны различия в межфазной зоне «матрица-волокно», характеризующей монолитность композита и его «работоспособность» при воздействии поперечных нагрузок. Известно, что вследствие на два порядка больших значений модуля упругости армирующих волокон по сравнению с матрицей прочность ПКМ при растяжении определяется физико-механическими свойствами волокон. Прочность матрицы практически не

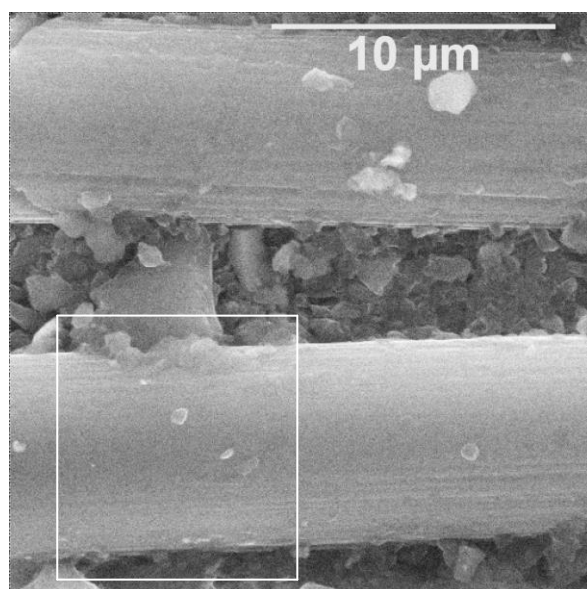
имеет значения. Однако при поперечных нагрузках большое значение имеет связь между волокнами, их совместное противодействие перерезывающим силам и изгибающим моментам. Консолидация волокон обеспечивается через связь с матрицей. Однако из-за особенностей технологии и химического состава в области контакта формируется межфазная зона, имеющая худшие прочностные характеристики по сравнению с матрицей.



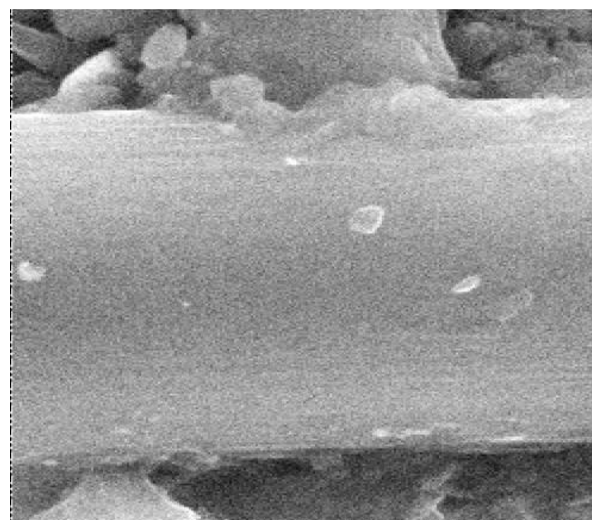
а



б



в



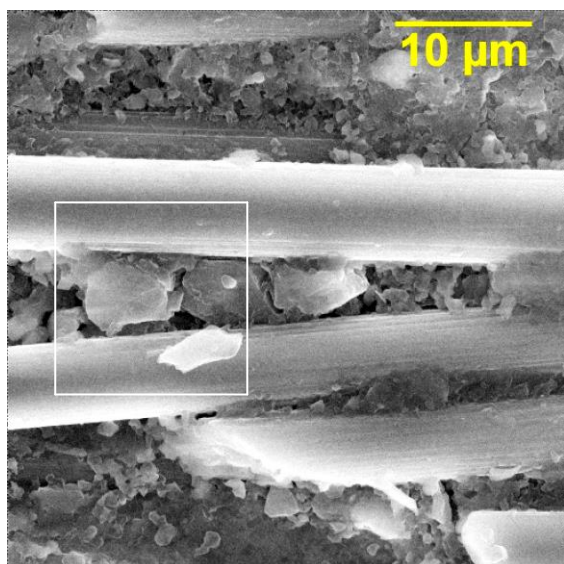
г

Рис. 5. Углеродное волокно обработанного (а, б) и контрольного (в, г) образцов при увеличении $\times 10000$

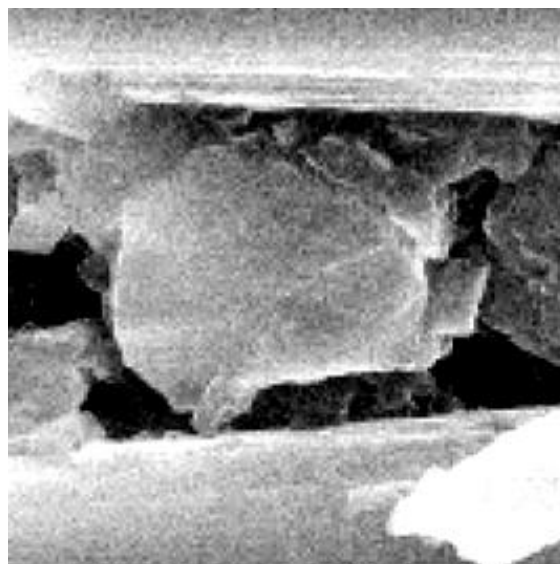
В связи с этим надежность адгезионного взаимодействия в межфазной зоне будет определяться количеством сшивок поверхности волокна и матрицы. На рис. 6 видно, что волокно контрольного образца практически свободно размещено в матрице, окружено кольцевой полостью. Можно выделить только 2-3 точечных контакта с общей протяженностью зоны адгезионного взаимодействия примерно на 10% поперечного сечения волокна. Волокно обработанного образца имеет зону адгезионного взаимодействия равную 40-50% поперечного сечения. Данный факт может явиться при-

чиной повышения прочности ПКМ, модифицированных в СВЧ электромагнитном поле, по напряжениям изгиба и межслоевого сдвига.

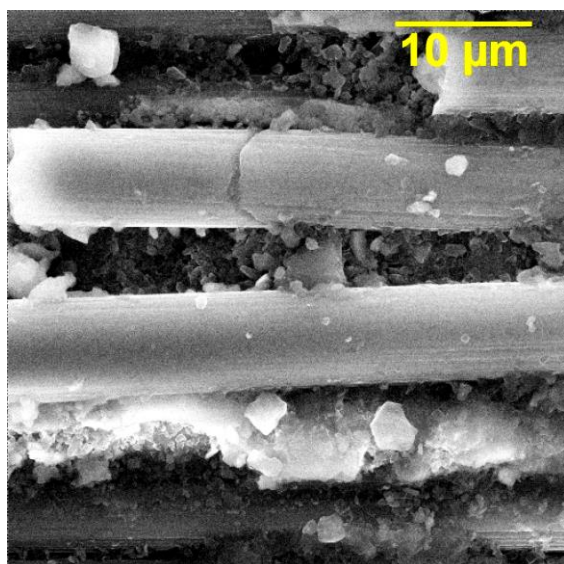
На основе проведенного анализа можно предложить следующий механизм влияния СВЧ электромагнитного поля на отвержденные армированные углеродными волокнами ПКМ. Электромагнитные поля, особенно высокого и СВЧ диапазона, при воздействии на диэлектрические материалы вызывают поляризацию их молекул, образующих диполи, выстраивающиеся вдоль силовых линий.



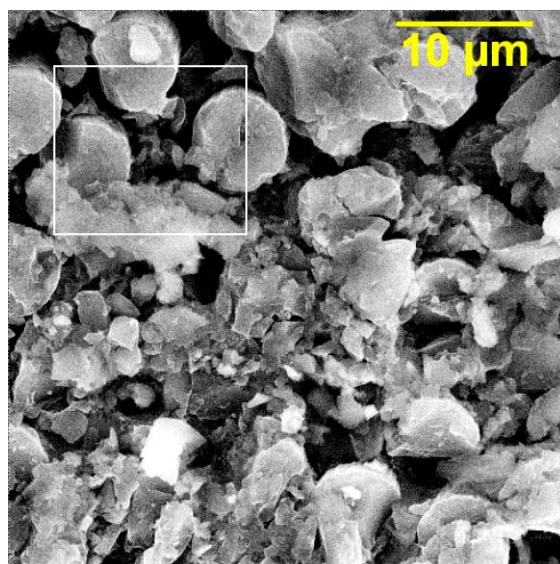
а



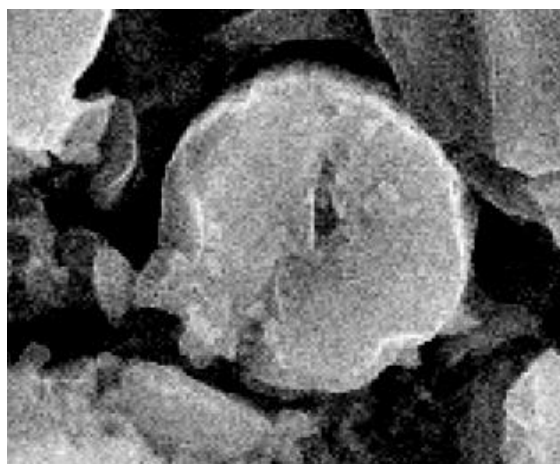
б



в



г



д

Рис. 6. Углеродное волокно обработанного (а) и контрольного (в) образцов и межфазная зона (б) и (г, д), соответственно, при увеличении $\times 5000$

При этом колебания поля приводят к колебаниям диполей, которые, в свою очередь, через определенное число циклов могут разрываться с образованием отдельных фрагментов, кластеров, что увеличивает площадь контактной поверхности. Таким образом, влияя на межкомпонентные связи, в том числе на уровне нанокластеров, возможно увеличить число контактных точек и активизировать взаимодействие матрицы и армирующих материалов, а также «залечить» микродефекты, образовавшиеся при отверждении композиции.

Итак, путем воздействия электромагнитных полей определенного диапазона возможно управлять свойствами готового

материального объекта. В данном направлении целесообразно проведение дополнительных исследований с применением математического и компьютерного моделирования для построения физической модели процесса и уточненного выявления механизмов воздействия СВЧ электромагнитного поля с неоднородными по физико-механическим, тепло- и электрофизическим свойствам материалами.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-03-00720 «Методология оптимизационного микроконструирования композиционных материалов для объектов сложной формы повышенной динамической прочности, послойно формируемых электротехнологическими методами».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Каблов Е.Н.** Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» / Е.Н. Каблов // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3-33.

2. **Каблов Е.Н.** Материалы и химические технологии для авиационной техники / Е.Н. Каблов // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520-530.

3. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ-электротермии / Ю.С. Архангельский. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.

4. Экспериментальные исследования уровня неравномерности нагрева диэлектрических материалов и поглощенной мощности в СВЧ устройствах резонаторного типа / В.А. Коломейцев, Ю.А. Кузьмин, Д.Н. Никуйко, А.Э. Семенов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2013. Т. 18. № 12. С. 25-31.

5. **Калганова С.Г.** Электротехнология нетепловой модификации полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле:

дис. ... д-ра техн. наук / С.Г. Калганова. Саратов: Саратов. гос. тех. ун-т, 2009. 356 с.

6. **Zlobina I.V.** The Influence of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev // Научные технологии. 2016. Т. 17. № 2. С. 25-30.

7. **Zlobina I.V.** The influence of electromagnetic field microwave on physical and mechanical characteristics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structural / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev // Solid State Phenomena. 2016. Vol. 870. P. 101-106.

8. **Zlobina I.V.** Increasing of the endurance of polymeric construction materials with the multilevel hierarchical structure in the microwave electromagnetic field / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev, G.K. Muldasheva // AIP Publishing, 020236-1 – 020236-4.

9. **Злобина И.В.** Исследование микроstructures конструкционных слоистых углепластиков, модифицированных путем электрофизических воздействий / И.В. Злобина, Н.В. Бекренев // Вестник РГТУ. 2017. № 1 (40). С. 236-242.

Злобина Ирина Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратов-

Irina V. Zlobina – PhD, Associate Professor, Department of Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Tech-

ского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Бекренев Николай Валерьевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

nical University of Saratov

Nikolai V. Bekrenev – Dr.Sc., Professor, Head: Department of Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 01.06.18, принята к опубликованию 20.06.18



ЛЕТОПИСЬ

КРЫМСКИЙ МОСТ



Наталья Евсегнеевна Кокодеева – доктор технических наук, заведующая кафедрой «Транспортное строительство», директор института энергетики и транспортных систем Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Научные труды в области транспортного строительства.

«ВЭ» 16 мая 2018 г. открыто автомобильное движение по мосту через Керченский пролив. Возведение и ввод в эксплуатацию этого моста имеют, безусловно, огромное социально-политическое значение. Но это грандиозное сооружение – успех в области транспортного строительства. Расскажите, пожалуйста, об основных научно-технических особенностях успехов специалистов транспортных систем.

К.Н.Е. Крымский мост, конечно же, входит в список самых знаковых и масштабных инфраструктурных сооружений, и не только по меркам нашей страны. Ведь это самый протяжённый мостовой переход в Европе. 19 км! Для наших отечественных специалистов-транспортников реализация такого уникального проекта стала настоящим профессиональным вызовом.

Был внимательно изучен неудачный опыт прошлых лет по строительству переправы через Керченский пролив. Проведена мощная изыскательная работа, исследованы особенности геологии, морской среды, климатических условий. Российскими проектировщиками из Санкт-Петербурга был разработан очень качественный проект,

предусматривающий применение передовых технологий мостостроения. К примеру, из-за крайне сложных грунтовых условий фундаменты опор мостового перехода в русловой части и на острове Тузла имеют свайное поле из стальных трубчатых свай, которые погружались виброустановками и гидромолотами на глубину до 100 м. Высота 30-метрового дома! В акватории сваи, на которые предварительно наносилась антикоррозионная защита, погружались с использованием специально запроектированных и изготовленных самодвижущихся платформ УПС (устройство для погружения свай), укомплектованных стреловым гусеничным краном грузоподъемностью 280-350 т.

Строительство монолитных железобетонных опор выполнялось с предварительно сооруженных рабочих технологических мостов. Несмотря на и так трудоемкий процесс армирования и бетонирования массивных высоких опор, условия для строителей были, мягко говоря, не простыми. В отдельные дни просто приходилось приостанавливать работы, настолько сильные ветра и шторма в той местности. Для противодействия ледоста-

ву в зимний период и морской стихии в летний устраивалась волнозащита опор из шпунтового ограждения.

Хочется отметить, что строительство Крымского моста повлекло за собой загрузку множества отечественных заводов и предприятий, создание тысяч рабочих мест, разработку множества технологических ноу-хау, вплоть до изобретения новых материалов. Так, десятки тысяч тонн и километры металлоконструкций пролетных строений мостового перехода поставлялись с предприятий из Кургана, Воронежа, Белгорода. Монтаж пролетных строений на различных участках строительства происходил по разной технологии: в навес, в полунавес, с помощью продольной или поперечной надвижки.

Самым запоминающимся и уникальным событием стала операция по монтажу арочных пролетных строений в фарватере. Гениальность технической мысли наших инженеров-мостовиков позволила осуществить сложнейшую операцию по транспортировке с Керченского побережья, подъему и монтажу в проектное положение арок а/д и ж/д мостов весом 5 тыс. и 6 тыс. тонн соответственно и длиной по 227 м.

Примечательный факт – строительство такого масштабного объекта полностью было осуществлено российскими специалистами! Это говорит о высоком уровне инженерной подготовки и компетенций в сфере транспортного строительства.

И особенно радостно, что выпускники нашего СГТУ имени Гагарина Ю.А. также приняли непосредственное участие в строительстве Крымского моста. К примеру, на одном из самых сложных участков – от острова Тузла до судоходного пролета – опоры в акватории Керченского пролива строило подразделение АО «Мостострой-11» - ТФ «Мостоотряд-36», директором ко-

торого является выпускник кафедры «Мосты и транспортные тоннели», ныне кафедры «Транспортное строительство», Андрей Лазарев. Главный инженер подразделения – также саратовский выпускник Александр Пажитнов. Выпускники кафедры «Транспортное строительство» работали на Крымском мосту в других строительных организациях (Москва, Новосибирск) и организациях, занимающихся строительным контролем. Между прочим, наши нынешние студенты ежегодно проходят в этой компании летнюю производственную практику на строящихся объектах: на Крымском мосту, в Тюмени, Нижнем Новгороде, в ХМАО и ЯНАО.

Наш Институт энергетики и транспортных систем всегда интенсивно ищет новые форматы взаимодействия с бизнес-структурами в области подготовки инженеров-строителей. И прохождение производственных практик на реальном производстве – один из ключевых этапов подготовки будущих специалистов.

Если говорить о строительстве Крымского моста, то крайне важно, что тысячи наших специалистов получили такой колоссальный опыт, ведь России, откровенно говоря, не хватает очень многих инфраструктурных объектов. Сейчас ведутся переговоры о строительстве совмещенного моста через р. Обь в районе Салехарда, крупные проекты анонсированы в Новосибирске и Уфе. Мы, конечно, надеемся, что и в Саратове в ближайшем будущем начнется строительство нового моста через Волгу. И теперь для качественного и эффективного осуществления таких уникальных проектов наши отечественные специалисты смогут воспользоваться опытом строительства Крымского моста.

«ВЭ» Спасибо, Наталия Евсегнеевна!

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТОК СГТУ ИМЕНИ ГАГАРИНА Ю.А. В ОБЛАСТИ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ В Г. САРАТОВЕ

Ю.С. Архангельский

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. получил статус опорного вуза, тем самым подтверждена роль, которую играет вуз в жизни Саратова и нашего региона уже многие годы. Подготовка специалистов в области энергетики, автомобильного хозяйства, машиностроения, электронного приборостроения, электротехнологии, цифровой технологии, в области гуманитарных отраслей, научные достижения в области тепло- и электроэнергетики, электроники СВЧ, сварки, материаловедения, дорожного строительства, гидравлики, систем управления и многое другое, чем может гордиться СПИ – СГТУ имени Гагарина Ю.А., что используется в жизни г. Саратова и региона.

Свое место в этом перечне занимает подготовка кадров в области электротехнологии и научные разработки в области СВЧ электротехнологии.

В различных отраслях промышленности, в сельском хозяйстве, в медицине, в научных исследованиях, в быту широко используют термообработку диэлектрических сред, материалов и изделий, биологических объектов и пищевых продуктов.

Интенсифицировать процесс термообработки диэлектрика, повысить равномерность его нагрева по объему можно, нагревая диэлектрик в СВЧ электромагнитном поле [1, 2].

Научные исследования и разработки в области СВЧ нагрева диэлектриков начались на промышленных предприятиях Саратова в начале второй половины прошлого столетия. Именно в Саратове были разработаны и изготовлены первые отечественные СВЧ печи «Волжанка» и «Славянка», первый отечественный источник СВЧ энергии технологического назначения «Парус». В Саратовском политехническом институте

(СПИ) эти работы были начаты в 1968 – 1970 г. г. в отраслевой лаборатории электронной техники кафедры электроники факультета электронной техники и приборостроения. С первых же шагов в этой работе были установлены тесные научно-технические связи между предприятиями Саратова, работающими в области СВЧ нагрева, и кафедрой электроники СПИ [3-5].

Так, только благодаря сотрудничеству саратовского промышленного предприятия, СПИ и биологического факультета СГУ им. Н.Г. Чернышевского был разработан первый отечественный пастеризатор молока в потоке, была объяснена природа подавления в СВЧ электромагнитном поле жизнедеятельности микроорганизмов при меньшей, чем при традиционных способах пастеризации, температуре [6].

В те годы в Саратове на промышленные предприятия и в СПИ поступало много заявок на разработку и изготовление промышленных установок разного назначения, использующих СВЧ нагрев. Эти заказы были выполнены в СПИ по хозяйственным договорам благодаря научно-техническому сотрудничеству саратовской промышленности с СПИ, причем тематика НИР и ОКР была самой разнообразной, начиная от обработки пищевых продуктов до сушки проявленной киноплёнки при тиражировании кинофильмов [3-11].

Производимые в СПИ – СГТУ имени Гагарина Ю.А. кадровые перестановки, решающие текущие проблемы вуза, сказывались на масштабах и интенсивности научных исследований в области СВЧ электротермии, но, с другой стороны, это способствовало началу исследований в области СВЧ нагрева на других кафедрах вуза. В результате в 1992 г. на энергетическом факультете СГТУ была создана профильная

кафедра «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» (АЭУ). Руководство СГТУ приняло это решение с учетом успехов исследований в области СВЧ электротермии, проводимых в вузе, и с учетом настойчивых ходатайств руководителей ведущих промышленных предприятий Саратова, поскольку в промышленности уже широко использовались электротехнологические процессы и установки, и саратовским предприятиям требовались специалисты в этой области. Так что в прошлом году исполнилось 25 лет с того времени, когда в Саратове началась подготовка инженеров, специалистов, бакалавров и магистров в области электротехнологии для промышленных предприятий [12].

В 90-е годы научные исследования в области СВЧ электротермии в СГТУ на кафедре АЭУ проводились в основном за счет бюджетных средств вуза. Существенно ослабли связи с промышленностью Саратова. Но все-таки имеющегося на кафедре АЭУ потенциала оказалось достаточно для получения принципиально новых научных результатов. Речь идет об экспериментальном подтверждении и изучении так называемой нетепловой модификации полимеров неживой природы. При кратковременном пребывании полимера в СВЧ электромагнитном поле с заданной напряженностью у полимера появляются новые технологические свойства, он упрочняется, делается более термостойким, эластичным и при этом он практически не нагревается [13]. Пока что нет математического описания этого эффекта, но в СГТУ имени Гагарина Ю.А. уже накоплен опыт по проектированию установок нетепловой СВЧ модификации.

В 2006 г. на первом всероссийском конкурсе научных школ РФ межфакультетская научная школа СГТУ, работающая в области СВЧ электротехнологии, была признана ведущей научной школой России в области инженерных и технических наук. В 2016 г. в СГТУ имени Гагарина Ю.А. кафедра «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» была объединена с кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий».

Сейчас СГТУ имени Гагарина Ю.А. электротехнологи знают главным образом как вуз, в котором созданы научные основы СВЧ диэлектрического нагрева.

Так, сформулирована и решена самосогласованная краевая задача электродинамики, тепломассопереноса и термомеханики [3, 7, 14], решены задачи анализа и синтеза рабочих камер [3, 7, 15, 16], разработаны методы математического моделирования различных технологических процессов термообработки с фазовыми переходами в СВЧ электромагнитном поле [3, 7, 16], показана природа нетепловой СВЧ модификации полимеров неживой природы [13], предложены новые типы рабочих камер (камеры с бегущей волной [3, 7, 15]), камеры гибридного типа, в которых одновременно проводится тепловая и нетепловая СВЧ модификации диэлектриков [18], разработаны принципы проектирования СВЧ электротехнологических установок с технико-экономической оптимизацией их структуры и параметров, что позволяет учитывать особенности рыночной экономики [4, 8, 19, 20], разработаны методы и средства измерений в СВЧ электротехнологии [21], издан учебник по СВЧ диэлектрическому нагреву [22], справочник по СВЧ электротермии [23], идет издание монографий серии «СВЧ электротехнология» [14-16, 20, 21]. В вузе подготовлено 5 докторов технических наук и несколько десятков кандидатов технических наук в области обработки диэлектрических сред, материалов и изделий в СВЧ электромагнитном поле.

Перед научным коллективом новой кафедры «Электроснабжение и электротехнология» стоит задача дальнейшего развития сотрудничества с промышленными предприятиями Саратова и области.

На этом пути, на наш взгляд, предстоит, во-первых, определить востребованные направления научной работы в области СВЧ электротехнологии. Во-вторых, предстоит найти и обсудить с промышленными предприятиями возможные формы сотрудничества. В-третьих, непременно следует решить вопрос о финансировании научных исследований.

Что касается научного направления в СВЧ электротехнологии, то это, безусловно, применение СВЧ электротехнологических процессов и установок в сельскохозяйственном производстве. Это предпосевная обработка семян, СВЧ сушка собранного зерна и другой сельскохозяйственной продукции, пастеризация молока. Методы проектирования таких установок в СГТУ уже освоены, имеются достаточные для успеха представления о конструкциях установок и реализуемых ими технологических процессах. В этой работе следует найти взаимовыгодное сотрудничество с заказчиком и с предприятием-производителем СВЧ генераторов и источников их питания – самых дорогостоящих элементов установок. Саратовская область в последние годы демонстрирует успехи в области производства сельскохозяйственной продукции, и интенсификация производственных процессов в этой области пойдет на пользу.

Речь должна идти, разумеется, о внедрении на саратовских предприятиях нетепловой СВЧ модификации полимеров. Применение этих материалов расширяется, и следует расширить исследования в этой области СВЧ электротехнологии. Следует, например, перейти от оптимизации времени пребывания полимера в СВЧ электромагнитном поле к оптимизации частоты СВЧ генератора. Это направление не исследовалось вовсе.

Следует уделить внимание исследованию материаловедческого аспекта СВЧ электротехнологии. Ведь получение новых материалов, придание используемым материалам новых полезных технологических свойств – залог успехов различных отраслей техники. Например, повышение термостойкости строительных материалов с помощью СВЧ модификации существенно понизит

угрозу возникновения пожара, а улучшение строительных материалов способствовало бы повышению качества строящихся зданий, сооружений, транспортных систем.

Известно, какую проблему представляет переработка, утилизация бытовых отходов. Определенную роль в ее решении могли бы внести СВЧ электротермические установки. В этом направлении требуются серьезные научно-технические разработки, но успех работ в этом направлении предсказуем.

Естественно сохранить объемы НИР традиционных для СГТУ областей применения СВЧ энергии. Эти научные исследования требуют сложных экспериментов, а для их проведения нужно дорогостоящее оборудование. Скажем, СГТУ по силам довести до опытного образца СВЧ сушилки для спасения книг, пострадавших при тушении пожара, разработки опытных образцов комплекта СВЧ электротермического оборудования для ремонта и строительства дорог и аэродромов.

Заслуживает внимания углубление теоретических основ СВЧ электротехнологии: добавление в согласованную краевую задачу электродинамики, тепломассопереноса и термомеханики уравнений электромеханики, гидравлики, исследования в области СВЧ электротермии с переменной частоты СВЧ электромагнитных колебаний, разработка научных основ высокотемпературной СВЧ электротермии, принципов построения систем управления СВЧ электротехнологическими комплексами и системами.

Промышленные предприятия, как показывает опыт прежних лет, охотно откликаются на предложения о научно-техническом сотрудничестве, и СГТУ имени Гагарина Ю.А. успешно выполнит свою миссию опорного вуза региона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пюшнер Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот / Г. Пюшнер. М.: Энергия, 1968. 311 с.
2. СВЧ энергетика / под ред. Э. Окерсса. М.: Мир, 1971. Т. 2. 271 с.

3. Архангельский Ю.С. Сверхвысоко-частотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов / Ю.С. Архангельский, И.И. Девяткин. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1983. 140 с.

4. **Толстов В.А.** Эффективность электротехнологических установок / В.Л. Толстов, Ю.С. Архангельский. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2000. 146 с.
5. **Сатарев И.К.** Микроволновые установки с бегущей волной для термообработки диэлектрических материалов / И.К. Сатарев, В.В. Комаров. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2000. 120 с.
6. Влияние электромагнитных полей сверхвысокочастотного диапазона на бактериальную клетку / В.В. Игнатов, В.Н. Панасенко и др. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1978. 77 с.
7. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.
8. **Колесников Е.В.** Проектирование электротехнологических установок / Е.В. Колесников. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2006. 282 с.
9. **Архангельский Ю.С.** История СВЧ электротехнологии / Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2014. № 3 (4). С. 100-110.
10. **Архангельский Ю.С.** История СВЧ электротехнологии / Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2014. № 4 (5). С. 99-110.
11. **Архангельский Ю.С.** История СВЧ электротехнологии / Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2015. № 1 (6). С. 144-154.
12. **Архангельский Ю.С.** Двадцатипятилетняя подготовка электротехнологов в г. Саратове / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый // Вопросы электротехнологии. 2017. № 2 (15). С. 119-122.
13. СВЧ модификация полимеров / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина, В.А. Лаврентьев, С.К. Слепцова. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2012. 288 с.
14. Электрофизические методы СВЧ обработки / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина, К.Н. Огурцов, Р.К. Яфаров. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2014. 196 с.
15. **Архангельский Ю.С.** Камеры с бегущей и со стоячей волной / Ю.С. Архангельский, Е.В. Колесников. Саратов: Буква, 2015. 232 с.
16. **Архангельский Ю.С.** Камеры лучевого типа / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый. Саратов: Амирит, 2017. 198 с.
17. **Архангельский Ю.С.** Компьютерное моделирование СВЧ электротермических процессов и установок / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2006. 212 с.
18. **Добродум А.С.** СВЧ электротехнологические установки с гибридными камерами / А.С. Добродум, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2017. № 3 (16). С. 16-22.
19. **Архангельский Ю.С.** Элементная база СВЧ электротермического оборудования / Ю.С. Архангельский, В.А. Воронкин. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2003. 212 с.
20. **Архангельский Ю.С.** Технико-экономический и социальный аспекты электротехнологии / Ю.С. Архангельский, Е.В. Колесников. Саратов: Амирит, 2017. 197 с.
21. **Архангельский Ю.С.** Измерения в СВЧ электротехнологических установках / Ю.С. Архангельский, С.Г. Калганова, Р.К. Яфаров. Саратов: Амирит, 2018. 322 с.
22. **Архангельский Ю.С.** Установки сверхвысокочастотного диэлектрического нагрева / Ю.С. Архангельский. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2010. 280 с.
23. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии / Ю.С. Архангельский. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Приглашаем к сотрудничеству ученых, преподавателей, сотрудников научных коллективов кафедр и лабораторий вузов, научно-исследовательских институтов, аспирантов, студентов, руководителей промышленных предприятий, разработчиков новой продукции, инвесторов, представителей органов власти.

По вопросам публикации статей в научно-техническом журнале «Вопросы электротехнологии» обращаться по телефонам:

8 (8452) 99-87-63 – Архангельский Юрий Сергеевич (главный редактор),

8 (927) 623-03-25 – Тригорлый Сергей Викторович (ответственный секретарь).

Просьба направлять публикации по адресу:

Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, ком. 1/133а, гл. редактору журнала «Вопросы электротехнологии» Архангельскому Ю.С. и по электронной почте eltech@sstu.ru.

Требования к оформлению публикаций

Печатный вариант публикации предоставляется объемом до 10 стр. формата А4; поля: сверху и снизу по 25 мм, справа и слева по 20 мм, через одинарный интервал, шрифт Times New Roman 12, абзацный отступ 0,63 см, формат файла *.doc, редактор Microsoft Word 2003.

Иллюстрации (рисунки, графики) выполняются в формате .jpg, располагаются в тексте статьи и должны иметь номер и подпись. Рисунки и фотографии должны иметь контрастное изображение.

Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

ОБЯЗАТЕЛЬНО наличие индекса УДК и списка использованных источников, оформленного по ГОСТ 7.1-2003 и включающего: фамилию и инициалы автора, название статьи, название журнала, том, год, номер или выпуск, страницы, а для книг – фамилии и инициалы авторов, точное название книги, место издания (город), издательство, год издания, количество страниц.

Также предоставляется информация об авторах (**ФИО полностью, почетные звания, ученая степень, ученое звание, должность, место работы, телефон, e-mail**), название статьи, аннотация и ключевые слова. Данная информация дублируется на **английском языке**.

Специалисты в технических и естественнонаучных отраслях к публикации **ОБЯЗАТЕЛЬНО** прилагают экспертное заключение.

Публикации принимаются в течение всего года.

Публикации, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются.

Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

За дополнительной информацией обращайтесь на сайт журнала «Вопросы электротехнологии» www.sstu.ru/nauka/nauchnye-izdaniya/voprosy-elektrotekhnologii

Редактор Л.А. Скворцова
Компьютерная верстка О.В. Пачина, Ю.Л. Жупилова
Перевод на английский язык А.Х. Аскарова

Почтовый адрес: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Телефон: (8452) 99-87-63

E-mail: eltech@sstu.ru

Подписано в печать 25.06.2018

Формат 60×84 1/8

Бум. офсет.

Усл. печ. л. 13,0

Уч. изд. л. 6,0

Тираж 500 экз.

Заказ 43

Цена свободная

Отпечатано в Издательстве СГТУ, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

E-mail: izdat@sstu.ru

Полная электронная версия журнала размещена в системе РИНЦ

в открытом доступе на платформе eLIBRARY.RU

Подписной индекс 70841 (каталог «Газеты. Журналы» на 2-е полугодие 2018 г.)

Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621 от 01.07.2013*

Editor L.A. Skvortsova
Computer-assisted layout by O.V. Pachina, .Yu.L. Zhupilova
Translation into English by A.H. Askarova

Address: 77 Politekhnikeskaya Str., 410054, Saratov, Russia

Tel.: (8452) 99-87-63

E-mail: eltech@sstu.ru

Print date: 25.06.2018

Paper size: 60×84 1/8

Offset-Print

Conventional printed sheet 13,0

Publication base sheet 6,0

Circulation: 500 printed copies

Order 43

Subscription and individual copies: open rates

Published by SSTU Publishing, 410054 Saratov, 77 Politekhnikeskaya Str.

Online at www.eLIBRARY.RU

The certificate of media source registration: PI No. *FS77-54621 dated 1 July 2013*